

Einfache Beschichtungskontrolle mit thermischer Schichtprüfung

Hochgeschwindigkeits-Infrarotsensorik ermöglicht zuverlässige Bestimmung von Schichteigenschaften

Schutzbeschichtungen sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Systematische Beschichtungsfehler oder Verschleiss durch Alterung bergen indessen ein Gefahrenpotenzial. Abhilfe kann eine schnelle, zerstörungsfreie und berührungslose Methode schaffen: die thermische Schichtprüfung. Das Messsystem wurde an der ZHAW School of Engineering in Winterthur entwickelt.

Nils A. Reinke, Andor Bariska

Die meisten Gegenstände, die wir täglich gebrauchen, werden zum Schutz und zur Dekoration beschichtet. Verschleiss-teile in Motoren, Triebwerken und industriellen Fertigungsanlagen können dank hochwirksamen Schutzbeschichtungen günstiger hergestellt werden und haben eine längere Lebensdauer. Aussenflächen von Flugzeugen, Schienen- und Strassenfahrzeugen haben alle auf ihre Anwendung optimierte mehrlagige Korrosions-, Schlagschutz- und Dekorationsbeschichtungen.

Grenzwerte für Beschichtungsparameter wie Dicke, Homogenität, Materialzusammensetzung und Haftung sind entweder vertraglich, durch Normen oder über Standards vorgegeben. Es liegt in der Verantwortung des Beschichters, die Einhaltung zu gewährleisten. Je nach Beschichtungsmethode und Materialkombination ist eine Kontrolle während des Beschichtungsprozesses aber nicht möglich; es können nur Stichproben am

Ende des Prozesses kontrolliert werden. Systematische Beschichtungsfehler können in der Zeitspanne zwischen der Entnahme von zwei Stichproben erkannt werden. Jedoch bleiben sporadisch auftretende Fehler wegen einer fehlenden kontinuierlichen Überwachung oftmals unerkannt. Aus diesen Gründen werden Beschichtungen tendenziell zu dick aufgetragen und damit Beschichtungsmaterial verschwendet. Beschichtungen unterliegen zudem Alterungsprozessen (z. B. Abrieb mechanisch belasteter Oberflächen), die ebenfalls zu Beschichtungsfehlern führen können.

Beschichtungsfehler als Gefahrenquelle

Beschichtungsfehler, ob produktionsbedingt oder durch Alterung entstehend, verursachen wirtschaftliche Folgeschäden und können ein Gefahrenpotenzial bergen. Die Nachfrage nach einer einfachen und schnellen Methode zur Kontrolle von Beschichtungen, die sowohl zum In-Line Monitoring (also der kontinuierlichen Überwachung in Beschichtungsprozessen) sowie zur Prüfung von beanspruchten Beschichtungen eingesetzt werden kann, ist entsprechend gross.

Eine konzeptionell einfache und zuverlässige Methode ist das Aufschneiden der Beschichtung und die Untersuchung mit dem Mikroskop. Ein Beispiel einer solchen Untersuchung ist in **Bild 1** zu sehen. Zum In-Line Monitoring resp. zur Prüfung alterungsbedingter Fehler ist die

Zerstörung der Beschichtung aber nicht zweckmässig.

Die weitverbreiteten elektromagnetischen Verfahren¹⁾ sind nur in der Lage, Dicke von Beschichtungen auf metallischen Unterlagen zu messen und benötigen Kontakt zur Oberfläche der Beschichtung. Zur zerstörungsfreien Bestimmung der Dicke einer Beschichtung auf Keramik, Beton, Holz oder Kunststoff existiert keine einfache Lösung. Bei erschwerenden Faktoren wie nassen, pulverförmigen, korrosiven, heissen oder bewegten Beschichtungen kommen nur noch berührungslose Verfahren infrage.

Eine besondere Herausforderung stellt die Messung der Dicke von mehreren übereinanderliegenden Schichten sowie die gleichzeitige Bestimmung mehrerer Beschichtungsparameter (beispielsweise Dicke und Haftung) mit einem berührungslosen Verfahren dar.

Neues Messsystem entwickelt

Die School of Engineering (SoE) der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Winterthur und die Firma Flo-ir in Oberdorf entwickelten gemeinsam ein Messsystem für die thermische Schichtprüfung, um diesen besonderen Anforderungen gerecht zu werden. Dieses Messsystem erlaubt die Bestimmung der Dicke, thermischer Eigenschaften, chemischer Zusammensetzung und Homogenität von Beschichtungen sowie das Erkennen von Haftungsproblemen direkt während des Beschichtungsprozesses.

In der thermischen Schichtprüfung wird die Oberfläche einer Beschichtung mit einer Anregungsquelle erwärmt, um Rückschlüsse über die Eigenschaften der Beschichtung zu ziehen. Zur Anregung kann beispielsweise ein Lichtblitz eingesetzt werden (**Bild 2**).²⁾ Nach einer kurzzeitigen Erwärmung um wenige Grad Celsius folgt die Abkühlung der Oberfläche durch Wärmeleitung in tiefere Bereiche der Beschichtung und der Unterlage. Der Verlauf der Abkühlung auf der Ober-

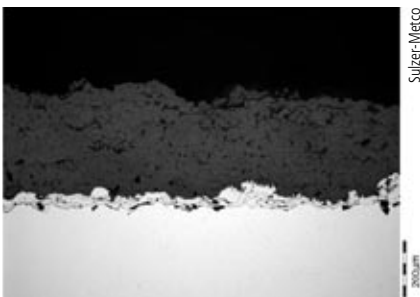


Bild 1 Querschliffbild thermisch gespritzter Beschichtungen (Haftschicht Mitte, Deckschicht oben) auf einer Stahlunterlage (unten).

fläche hängt von den physikalischen Eigenschaften der Beschichtung und der Unterlage ab.

Die Oberflächentemperatur klingt, wie beispielsweise in **Bild 3** dargestellt, um so schneller ab, je dünner die Beschichtung ist, sofern sie eine geringere thermische Leitfähigkeit als die Unterlage hat. Ebenso bewirkt eine schlechte Haftung der Beschichtung eine Verzögerung der Abkühlung, weil an der Grenzfläche ein starkes Temperaturgefälle entsteht: Es kommt zu einem Temperaturstau in der Beschichtung. Aus dem zeitlichen Verlauf der Oberflächentemperatur kann also auf Dicke, Haftung und Materialeigenschaften der Beschichtung geschlossen werden.

Wärmestrahlung verrät Fehler

Eine flexible und robuste Methode zur berührungslosen Temperaturmessung basiert auf der Detektion der Wärmestrahlung. Jeder Gegenstand ist eine Quelle für Wärmestrahlung, die umso intensiver ist, je höher seine Temperatur ist. Die detektierte Wärmestrahlung wird von Infrarotsensoren in elektrische Signale umgewandelt und anschließend digitalisiert. Zur Aufnahme des kurzzeitigen Verlaufs der Temperatur werden sehr schnelle Infrarotsensoren eingesetzt. Es ist eine Erfassungsrate von einigen Tausend Messwerten pro Sekunde erforderlich.³⁾ Um selbst bei dieser hohen Erfassungsrate eine Temporaufauflösung von 0,1°C oder besser zu erzielen, werden die Infrarotsensoren mit Peltier-Elementen oder mit Stirlingmotoren bis auf -200°C abgekühlt. Die Messung der Wärmestrahlung kann ortsaufgelöst über eine Fläche (Sensorarray) oder an einem Punkt (Einzelsensor) erfolgen. Die thermische Schichtprüfung erlaubt somit eine ortsaufgelöste, zerstörungsfreie, berührungslose und schnelle Bestimmung von Schichteigenschaften. Das Messsystem benötigt keine bewegten Teile, ist robust und kompakt. Daher eignet es sich zur Integration für In-Line Monitoring in industriellen Anlagen.

Porositätsmessung ohne Produktionsunterbrechung

Eine weitverbreitete Beschichtungsmethode ist das thermische Spritzen von keramischen Beschichtungen, die zum Schutz von thermisch oder mechanisch stark exponierten Oberflächen wie Turbinenschaufeln aufgetragen werden. Zur Qualitätskontrolle keramischer Beschichtungen gehört die Bestimmung der Poro-

sität, der Haftung sowie der Dicke der aufgetragenen Beschichtung.

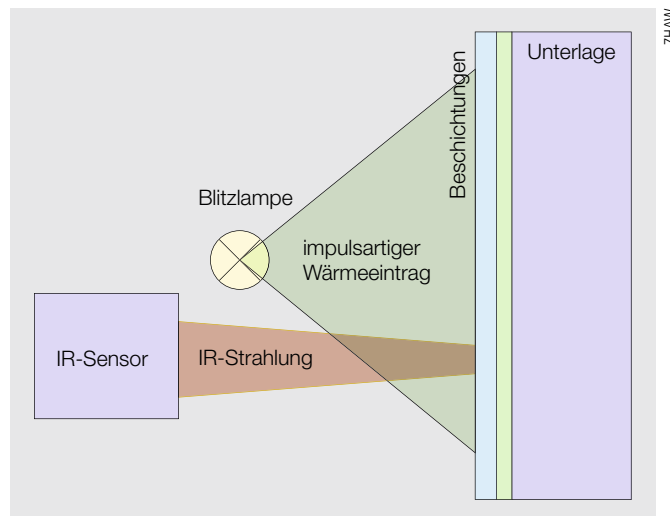
Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt zurzeit durch eine aufwendige, manuelle Untersuchung von Stichproben mittels Querschliffbildern in zertifizierten Laboren. Für die Anfertigung der Querschliffbilder wird die Stichprobe aus dem Produktionsprozess entnommen und aufgeschnitten. Für den Betreiber der Beschichtungsanlage ist diese Form der Qualitätssicherung infolge der ständigen Unterbrechungen des Produktionsprozesses mit erheblichen Mehrkosten und Zeitverlust verbunden. Es besteht also ein Bedürfnis nach einer schnellen und zerstörungsfreien Prüfmethode. Dieses Bedürfnis kann mit der thermischen Schichtprüfung erfüllt werden.

Die thermische Schichtprüfung erlaubt neben der Ermittlung der Schichtdicke und der Haftung auch die Bestimmung der Porosität, da sich Luft einschließen in thermisch gespritzten Beschichtungen auch auf thermische Eigenschaften wie Wärmekapazität und

Wärmeleitfähigkeit auswirken. Mit der thermischen Schichtprüfung ist somit die unterbrechungsfreie Qualitätssicherung im thermischen Spritzprozess möglich.

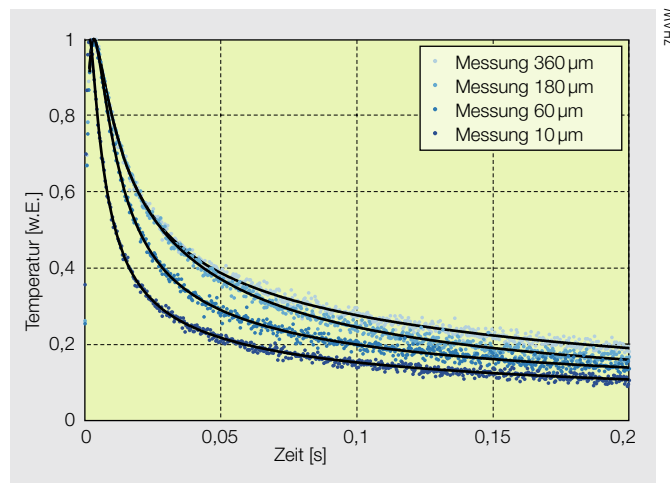
Haftungsprobleme frühzeitig erkennen

Ein weiteres Anwendungsfeld für die thermische Schichtprüfung stellt die Erkennung von Haftungsproblemen dar, welche beispielsweise beim Laminieren von Kunststofffolien entstehen können. Mit dem bloßem Auge sind Haftungsprobleme in der Regel nicht erkennbar. Die mangelnde Haftung macht sich oft erst nach der Produktion bemerkbar, beispielsweise bei auftretender Stauflüssigkeit oder mechanischer Belastung des Laminats. Mit der thermischen Schichtprüfung ist es möglich, Laminierungsfehler bereits während der Produktion zu erkennen. Laminierungsfehler weisen punktuelle oder flächige Luft einschlüsse auf. Während der Prüfung wird ein Wärmeeintrag im Laminat durch einen kurzen Lichtblitz erzeugt. Dieser Wärmeein-



ZHAW

Bild 2 Das Schichtsystem wird mit einer Blitzlampe erwärmt und die Oberflächentemperatur mit einem Infrarotsensor gemessen.



ZHAW

Bild 3 Typische Messkurven für Beschichtungen unterschiedlicher Dicke.

trag führt zu einer Temperaturerhöhung der Oberfläche. Die Zeit, welche die Oberfläche benötigt, um auf Raumtemperatur abzukühlen, ist nun abhängig davon, ob Laminat und Unterlage durch einen Lufteinschluss getrennt sind. Ohne Lufteinschluss kühlt das Laminat rasch ab, indem der Wärmeeintrag an die Unterlage abgegeben wird. Wenn ein Lufteinschluss vorliegt, kommt es zum Wärmestau am Übergang zwischen den beiden Materialien, und die Abkühlung der Oberfläche ist verzögert (**Bild 4**).

Prüfung mehrlagiger Lackbeschichtungen

Auch in der Automobilindustrie wächst die Nachfrage nach Prüfmethoden von Lackbeschichtungen. Karosserieteile werden mit einer Tauchlackierung (Grundierung), einem Füller, einem farbigen Basislack und einem Klarlack beschichtet [1]. Die Dicken der einzelnen Lackschichten im Gesamtsystem können bis jetzt nur mit zerstörenden Methoden, z. B. Keilschnitt- (DIN EN ISO 2808) oder Querschleifverfahren (DIN 50950), oder in Spezialfällen mit einem kontaktierenden Ultraschallmessgerät aufgelöst werden (ISO 2808). Die Dicke der Gesamtbeschichtung wird meistens mit elektromagnetischen Verfahren ermittelt.¹⁾ Immer häufiger werden jedoch auch in der Autoindustrie Karosserieteile aus Kunststoff beschichtet, wo diese Prüfverfahren nicht einsetzbar sind.

Die thermische Schichtprüfung ermöglicht die orts aufgelöste, zerstörungsfreie, berührungslose und schnelle Bestimmung von Dicken von mehreren übereinanderliegenden und nassen Lackierungsanstrichen in der Qualitätssicherung von Lackierprozessen.

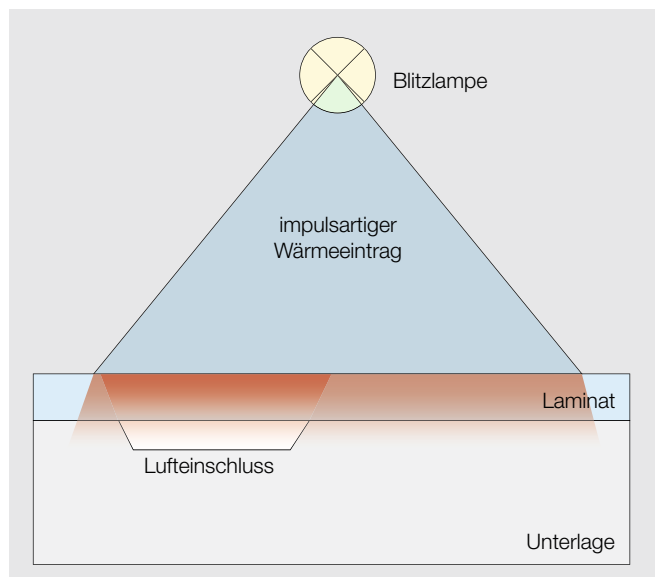
Vergleich mit anderen Prüfverfahren

Im Folgenden werden verschiedene berührungslose und zerstörungsfreie Schichtprüfverfahren diskutiert – weiterführende Erläuterungen siehe [2].

Rückstreuung von Betastrahlung

Verfahren basierend auf der Rückstreuung von Betastrahlung (DIN EN ISO 3543) bestrahlen das Schichtsystem mit hochenergetischen Elektronen, die von einer Isotopenquelle erzeugt werden. Ein Teil der einfallenden Elektronen verlässt aufgrund von mehrfachen Streuprozessen (Rückstreuung) die Schicht auf der Eintrittsseite. Die Rückstreurate, also die Impulsrate des im rückwärtigen Halb-

Bild 4 Wärmeausbreitung durch Laminat mit und ohne Haftungsfehler.



raum angeordneten Strahlungsdetektors, kann als Mass für die Schichtdicke benutzt werden.

Röntgenfluoreszenzverfahren

Im Röntgenfluoreszenzverfahren (DIN EN ISO 3497) wird die Beschichtung durch Bestrahlung mit harter Gammastrahlung zur Abgabe von Fluoreszenzstrahlung angeregt. Bei diesem Verfahren wird die Anzahl der Photonen als Mass für die Schichtdicke benutzt. Es wird hauptsächlich für die Prüfung von Metallbeschichtungen in der Elektronik-, Halbleiter- und Schmuckindustrie verwendet.

Optische Interferenz

Andere Verfahren benutzen das Prinzip der optischen Interferenz (Ellipsometrie und Reflektometrie). Das Schichtsystem wird entweder seitlich (Ellipsometrie) oder senkrecht (Reflektometrie) mit Weiss- oder Infrarotlicht beleuchtet. Je nach Brechungsindex wird ein Teil der einfallenden Strahlung wieder reflektiert. Das von der Oberfläche und der Grenzfläche reflektierte Licht führt wegen der unterschiedlichen Laufzeit zu Interferenzmustern, die bezüglich der Schichtdicke ausgewertet werden können. Die optischen Interferenzverfahren können nur für optisch transparente Beschichtungen angewandt werden und finden vor allem für die Untersuchung dünner Schichten im Nanometerbereich Einsatz.

Problematischer Einsatz

Der Einsatz der genannten Verfahren erfordert individuelle Voraussetzungen. Oft müssen wegen der für Menschen potenziell gefährlichen Anregungsstrahlung

spezielle Schutzmassnahmen ergriffen werden. Beispielsweise muss das Röntgenfluoreszenzverfahren in einer abgeschirmten Kammer angewendet werden. Wegen der einfacheren Handhabung werden daher in der Regel kontaktierende und zerstörende Prüfverfahren bevorzugt.

Das neue Messsystem im Detail

Das an der SoE entwickelte Messsystem bietet dank des kompakten Aufbaus und der einfachen Handhabung eine Alternative zu bestehenden berührungslosen und zerstörungsfreien Prüfmethoden, insbesondere unter industriellen Betriebsbedingungen. Zusätzlich ermöglicht es erstmals die berührungslose und zerstörungsfreie Prüfung von Beschichtungen, die bis anhin nicht oder nur zerstörend geprüft werden konnten. Das thermische Schichtprüfverfahren kann durch seine einzigartige Kombination von Eigenschaften sowohl zur Sicherung des Herstellungsprozesses als auch in der Qualitätskontrolle (Alterungs-, Delaminations- und Homogenitätsprüfung) eingesetzt werden.

Das Messsystem (**Bild 5**) ist dank einer zum Patent angemeldeten Anordnung seiner Komponenten sehr kompakt. Die beschleunigte Entwicklung in der IR-Sensorik und Optoelektronik wird in naher Zukunft die Erstellung von Handgeräten ermöglichen, die für mobile Messungen eingesetzt werden können. Die Messdaten werden mit einem an der ZHAW entwickelten Algorithmus ausgewertet, der beispielsweise die Bestimmung von relativen Schichtdicken ohne Kenntnis der thermischen Eigenschaften



ZHAW

Angaben zu den Autoren

Andor Bariska hat zunächst an der Hochschule Rapperswil Elektrotechnik und später an der ETH Zürich Mathematik studiert. Seit 2007 arbeitet er am IDP Institut für Datenanalyse und Prozessdesign der ZHAW als Projektleiter für angewandte Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Er ist spezialisiert auf Infrarot-Messtechnik und Datenanalyse in industriellen Anwendungen.

ZHAW, IDP Institut für Datenanalyse und Prozessdesign, 8401 Winterthur, andor.bariska@zhaw.ch

Dr. **Nils A. Reinke** erhielt im Jahr 2003 das Physik-Diplom der Universität Duisburg-Essen und promovierte bis 2007 an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Augsburg. Seitdem ist er Dozent für Physik am Institute of Computational Physics ICP und Leiter des Labors für optoelektronische Messtechnik an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Winterthur. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Simulation und Charakterisierung von Halbleiterbauelementen sowie der optischen Materialcharakterisierung.

ZHAW, ICP Institute of Computational Physics, 8401 Winterthur, nils.reinke@zhaw.ch

Bild 5 Messsystem im Einsatz bei der Prüfung von Korrosionsschutz-Beschichtungen.

der Beschichtung ermöglicht. Absolute Schichtdicken können mittels einer Referenzprobe bestimmt werden. Um den Messbereich zu erweitern, können zusätzliche Referenzproben herangezogen werden. Des Weiteren können durch den Algorithmus auch mehrere Beschichtungsparameter wie Dicke, Haftung oder Materialeigenschaften gleichzeitig bestimmt sowie mehrlagige Schichtsysteme untersucht werden. Durch diese Eigenschaften hebt sich das Messsystem von anderen thermischen Prüfmethode, wie z. B. in DIN EN 15042-2 beschrieben, entscheidend ab.

Weiter Messbereich, hohe Reproduzierbarkeit

Mit dem Messsystem lassen sich Schichtdicken im Bereich von 5 µm bis zu 1000 µm in einem Messpunkt mit einer Fläche von ca. 2 mm² messen. Die Resultate sind unempfindlich gegenüber Verkippung oder Abstandsänderungen. Damit eignet sich das Messsystem auch für Messungen auf unförmigen oder bewegten Objekten. Die Messdauer beträgt je nach Art der Beschichtung etwa 0,5 s bis 2 s. Die Genauigkeit der Messung verbessert sich mit zunehmendem Kontrast zwischen den thermischen Eigenschaften der Materialien im Schichtsystem.

Mit der thermischen Schichtprüfung kann eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Messung erreicht werden. Das Messverfahren wurde bereits erfolgreich für unterschiedliche Lack- und Pulverbeschichtungen auf Kunststoff-, Keramik-, Metall- und Holzunterlagen sowie an nassen Schleifmittelbeschichtungen auf Papier getestet. Es ist unempfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeit und Umgebungstemperatur.

Weiterentwicklung wird vorangetrieben

Die Entwicklung des Messsystems erfolgte in einem Forschungsprojekt (in gleichen Teilen finanziert von Industriebeiträgen und der Förderagentur für Innovation KTI des Bundes), das Anfang 2010 abgeschlossen wurde. Mit diesem Messsystem werden zurzeit Erfahrungen mit verschiedenen Messaufgaben der Industrie bezüglich Schichtprüfung gesammelt. In der ersten Hälfte des Jahres wurde das Messsystem am Thurgauer Technologietag (März 2010), an der Fraunhofer-Allianz-Vision «Sonderschau Berührungslose Messtechnik» in der Control2010 in Stuttgart (Mai 2010) und an der Winterthurer Nacht der Technik (Juni 2010) einem breiteren Publikum vorgestellt.

Die Weiterentwicklung der Technologie wird durch verschiedene Kollaborationen der Industrie und der ZHAW vorangetrieben und die Kommerzialisierung vorbereitet. Im Juni 2010 startete ein neues Forschungsprojekt, das sich mit einer Fragestellung bezüglich thermischer Schichtprüfung für einen speziellen Industriezweig beschäftigt. Parallel wird das Messsystem so weiterentwickelt, dass Messungen auch für Laien durchführbar und interpretierbar werden.

Referenzen

- [1] A. Goldschmidt, H.-J. Streiberger. BASF Handbuch Lackiertechnik, BASF Coatings AG, Vincentz Verlag, Hannover, 2002.
- [2] M. Bantel. Messgeräte-Praxis. Funktion und Einsatz moderner Messgeräte, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004.

Links

- www.engineering.zhaw.ch
- www.flo-ir.ch
- www.kti-cti.ch
- www.vision.fraunhofer.de/de/projekte/479.html

¹⁾ Methoden zur Bestimmung der Schichtdicke mittels elektromagnetischen Prinzipien sind in wirbelstrombasierte (DIN EN ISO 2360), magnetinduktive (DIN EN ISO 2178) und kapazitive (DIN EN ISO 2360) Verfahren unterteilt. Das magnetinduktive Verfahren wird zur Bestimmung der Dicke von nicht magnetischen Beschichtungen auf magnetischen Unterlagen eingesetzt, während das wirbelstrom- und das kapazitive Verfahren zur Bestimmung der Dicke von elektrisch nicht leitenden Beschichtungen auf leitenden Unterlagen dient [2].

²⁾ Zur Anregung werden neben Lichtblitzen auch Induktionspulse und andere pulsformige wie auch periodisch-modulierte Anregungsquellen eingesetzt.

³⁾ Im Vergleich arbeiten herkömmliche Videokameras mit einer Bildrate von 25 Hz, sind also tausendfach langsamer als die Infrarotkameras, die für den Gebrauch in der thermischen Schichtprüfung eingesetzt werden.

Résumé

Le contrôle de revêtements facilité grâce à l'analyse thermique

Un système de détection rapide utilisant un capteur infrarouge permet une caractérisation fiable des revêtements

La plupart des objets de tous les jours sont munis d'un revêtement à des fins de protection ou de décoration. Jusqu'à présent, le contrôle de l'épaisseur ainsi que des autres propriétés de cette couche était laborieux, onéreux et, dans certains cas, il pouvait même être dangereux de ne pas en déceler les défauts. Le nouveau système de mesure basé sur un capteur infrarouge à grande vitesse de détection offre la possibilité de contrôler le revêtement rapidement, sans détruire ni toucher le matériau. Ce système est capable aussi bien de contrôler en continu les processus de production que de déceler des défauts dus au vieillissement.

No