

Identifikation und Analyse von Kontaminationen und technischen Substanzen mittels IR-Spektroskopie

Dipl.-Ing. Marius Pflüger

Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

marius.pflueger@ipa.fraunhofer.de

1 Einleitung

Technische Sauberkeit ist nicht nur in Branchen, wie z.B. der Halbleiter- oder Medizintechnik, in denen hohe Anforderungen an die Hygiene gestellt werden, ein wichtiges Thema. Sauberkeit von Oberflächen spielt in praktisch allen Branchen, in denen Oberflächen bearbeitet und veredelt werden, eine Rolle. Neben der Prüfung der Sauberkeit ist häufig auch die Identifikation von Schichten und Substanzen auf technischen Oberflächen essentiell um die Funktionalität der Bauteile zu gewährleisten. In diesem Beitrag wird zum einen ein kostengünstiges Prüfverfahren zur einfachen Kontrolle der Sauberkeit von Oberflächen vorgestellt und zum anderen ein spektroskopisches Verfahren, mit dem eine weitergehende Analyse von Schichten auf Oberflächen möglich ist.

2 Ausgangssituation

In vielen Prozessen im heutigen Fertigungsumfeld sind Prüfungen von Oberflächen essentiell. So können Verunreinigungen auf Oberflächen, z.B. durch Fette oder Rückstände von Fertigungshilfsstoffen in nachgelagerten Prozessen wie beim Beschichten, Kleben oder Lackieren zu erheblichen Qualitätsmängeln führen. Zudem sind unvollständig aufgetragene Dichtungen oder Klebstellen häufig die Ursache für ein funktionelles Versagen von Bauteilen. Betrachtet man in der Prozesskette die Durchführung von Kontrollen bezüglich technischer Sauberkeit oder dem Vorhandensein von technischen Hilfsstoffen, so ist festzustellen, dass derartige Kontrollen häufig überhaupt nicht oder nur manuell bzw. visuell durch Prüfpersonal durchgeführt werden. Soll beispielsweise die Fettfreiheit von Oberflächen geprüft werden, so wird z.B. auf Benetzungstests oder die so genannte Fettrotprüfung zurückgegriffen. Einhundertprozentprüfungen sind mit derartigen Laborverfahren aus Zeit- und Kostengründen nur bei sehr kleinen Stückzahlen wirtschaftlich realisierbar. Jedoch werden, bedingt durch steigende Qualitäts- und Gewährleistungsanforderungen in der Industrie, zunehmend Einhundertprozentprüfungen gefordert und sind bei sicherheitsrelevanten Bauteilen obligatorisch.

Erschwerend für die Prüfung technischer Oberflächen kommt hinzu, dass ein großer Anteil der zu prüfenden Stoffe im visuellen Licht transparent ist oder keine eindeutigen optischen Erkennungsmerkmale zur Identifikation aufweist. Konventionelle Bildverarbeitungslösungen sind daher nur begrenzt anwendbar

während Laboranwendungen zu aufwendig sind und häufig nicht direkt in die Prozesse integriert werden können.

2.1 Anforderungen an die Prüftechnik

Aus den jeweiligen Einsatzgebieten ergeben sich für die Prüftechnik Anforderungen, die von Reinraumumgebungen, wie sie z.B. im medizintechnischen Bereich notwendig sind, bis hin zu sehr rauen Umgebungsbedingungen, die man z.B. in der Metallverarbeitung vorfindet, reichen können. Um ein geeignetes Prüfsystem konzipieren zu können, müssen unter anderem die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Ist das Prüfsystem kalibrierfähig? Sind also die Messergebnisse des Systems hinreichend stabil gegenüber den im Einsatzumfeld anzutreffenden Umgebungsbedingungen und sind die Messergebnisse mit ausreichender Genauigkeit reproduzierbar? Falls mehrere Systeme eingesetzt werden - vor allem, wenn sie sich an unterschiedlichen Standorten befinden - muss auch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet sein. Ebenso müssen die Messergebnisse konsistent mit den Ergebnissen anderer für die Messaufgabe eingesetzten Verfahren (z.B. im Prüflabor) sein.
- Ist die Messunsicherheit des Systems mit der Messaufgabe vereinbar? Sind also die Auflösungen und Genauigkeiten hinsichtlich Schichtdicken, Geometrie und Zusammensetzung ausreichend und können unterschiedliche Kontaminationen mit der erforderlichen Sicherheit voneinander getrennt werden?
- Gibt es besondere Anforderungen an Substratoberflächen z.B. die Oberflächenrauheit, die Form oder das Reflektionsverhalten?
- Reicht die Prüfgeschwindigkeit, um die vorgegebenen Prüfintervalle oder den Prozesstakt einzuhalten, und welche Schnittstellen zur Fertigungssteuerung oder zum QM-System sind vorzusehen?
- Wie müssen Benutzerschnittstellen gestaltet werden, damit die vorgesehenen Bediener das System sicher handhaben können?

Aus diesen Fragestellungen wird deutlich, dass ein einziges Prüfverfahren nie in der Lage sein wird, solch unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen. Im Folgenden werden zwei Prüfmethoden für die Beurteilung der Sauberkeit von Oberflächen vorgestellt, die eine große Bandbreite von Anforderungen abdecken können.

3 Das IPA Low-Cost-System

Kontaminationsschichten können schon bei Dicken im Mikrometerbereich und darunter negative Auswirkungen haben. Ein Kontaminationssensor sollte also in der Lage sein, solche dünnen Schichten zuverlässig und schnell zu erkennen, und außerdem robust genug sein, um in einer Fertigungsumgebung eingesetzt werden zu können.

3.1 Detektion dünner Schichten

Zur Vermessung dünner, transparenter Schichten werden üblicherweise optische Verfahren, wie die Ellipsometrie oder die Mehrstrahlinterferenz eingesetzt. Ersteres Verfahren basiert auf Polarisierungseffekten, die an den Schichten auftreten, das zweite Verfahren auf Interferenzen, die zwischen den Reflektionen an den Grenzen von Luft – Schicht und Schicht – Substrat auftreten. Diese Verfahren ermöglichen eine genaue Charakterisierung der Schichten, der Aufwand und die Messdauer sind aber im Allgemeinen zu hoch, um sie prozessintegriert einzusetzen. Für viele Anwendungen würde zudem schon eine Ja-Nein Aussage über das Vorhandensein von Kontaminationen, bzw. ein Schwellwert ausreichen.

Die geringe Absorption z.B. ölbasierter Schichten im sichtbaren Licht legt es nahe, andere Wellenlängenbereiche als den sichtbaren zur Erkennung dieser Schichten zu nutzen. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass Störungen durch Fremdlichteinfall minimiert werden. Der hier betrachtete nahe Infrarotbereich (NIR) umfasst die Wellenlängen von ca. 800nm – 2500nm. Bei diesen Wellenlängen treten hauptsächlich Kombinations- und Oberschwingungen von Absorptionsbanden organischer Moleküle im längerwelligen Infrarotbereich auf. Die Absorptionsbanden im NIR sind zwar deutlich schwächer als die jeweiligen Absorptionsbanden der Grundschwingungen, der apparative Aufwand zur Messung ist hier aber wesentlich geringer als der für den mittleren Infrarotbereich. NIR-Detektoren müssen z.B. nicht aktiv gekühlt werden und zur Beleuchtung reichen herkömmliche Halogen-Lampen aus. Detektoren für den NIR Bereich werden als Punkt-, Linien- und Matrixsensoren angeboten, die auf Basis der InGaAs (Indium-Gallium-Arsenid)-Technologie hergestellt werden.

3.2 Einfacher NIR-Detektor

Basierend auf den oben genannten Anforderungen wurde am Fraunhofer IPA ein Prüfverfahren entwickelt, mit dem produktionsbedingte Kontaminationen auf technischen Oberflächen erkannt werden können. Bei dem entwickelten Sensorsystem handelt es sich um einen Infrarotsensor, der mittels einer Reflexionsmessung den Verschmutzungsgrad der Oberflächen bestimmt. Das Prüfverfahren basiert auf einer Vergleichsmessung, bei welcher der Sensor auf die saubere Oberfläche kalibriert wird. Das ermittelte Signal der sauberen Oberfläche wird im Sensor als Referenzwert (Sollwert) hinterlegt. Während des Produktionsprozesses vergleicht das Sensorsystem die ermittelten Signale mit dem Referenzwert. Liegt der Signalwert außerhalb eines applikationsspezifischen Toleranzbereichs, kann je nach Einsatzfall entweder ein Reinigungsvorgang ausgelöst oder die Teile aussortiert werden. Durch die Kalibrierung auf die zu untersuchende Oberfläche ist das Prüfverfahren unempfindlich gegenüber Änderungen der Oberflächenrauheit und –struktur.

In Bild 3.1 ist das Funktionsschema des Sensorsystems dargestellt. Bei der Signalgenerierung wird durch einen Sinusgenerator ein Wechselstromsignal erzeugt, das durch einen Verstärker fallspezifisch einzustellen ist. Hierdurch ist es möglich, verschiedene Strahlungsintensitäten zu erzeugen und somit

unterschiedliche Oberflächenrauheiten und –strukturen sowie die Oberflächen von verschiedenen Materialien in-situ zu untersuchen. Um Umgebungseinflüsse, z. B. durch Sonneneinstrahlung, zu eliminieren, wird nur die Amplitude des Wechselstromsignals ausgewertet. Der IR-Empfänger ist über einen zweiten einstellbaren Verstärker und einen Wandler mit dem Komparator gekoppelt. Durch den eingesetzten Wandler wird das erzeugte Wechselstromsignal in ein Gleichstromsignal umgewandelt und mit dem Referenzsignal verglichen.

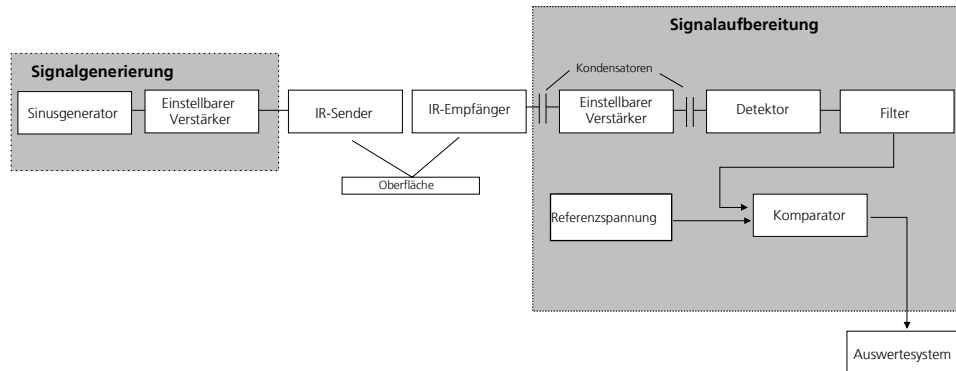


Bild 3.1: Funktionsschema des einfachen Sensorsystems

Zur Verbesserung der Messgeschwindigkeit wurde ein Messkopf aus sechzehn nebeneinander liegenden LED-Dioden-Paaren aufgebaut (Bild 3.2 links). Damit ist es möglich, Oberflächen schnell zu scannen und die Ausdehnung kontaminierter Bereiche abzuschätzen (Bild 3.2 rechts).

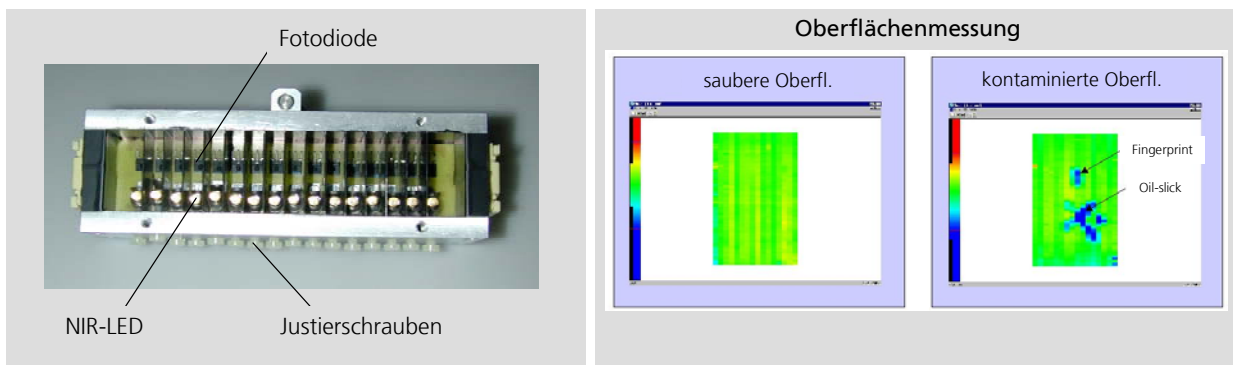


Bild 3.2: Messkopf und Ergebnisse einer Messung

3.3 Kombinierte Schicht- und Partikeldetektion

Ebenso wie die filmischen Kontaminationen haben häufig auch Verunreinigungen durch anhaftende Partikel einen negativen Einfluss auf die Qualität z.B. von Beschichtungsprozessen. Verfahren zur Detektion von Partikeln werden am Fraunhofer IPA seit vielen Jahren für die Reinraumtechnik entwickelt. Durch die Integration eines auf dem Streiflichtverfahren basierenden Partikeldetektors und des NIR-Sensors in einen kompakten Sensorkopf kann in einem einzelnen Messvorgang die Sauberkeit einer Oberfläche zuverlässig bewertet werden (Bild 3.4).

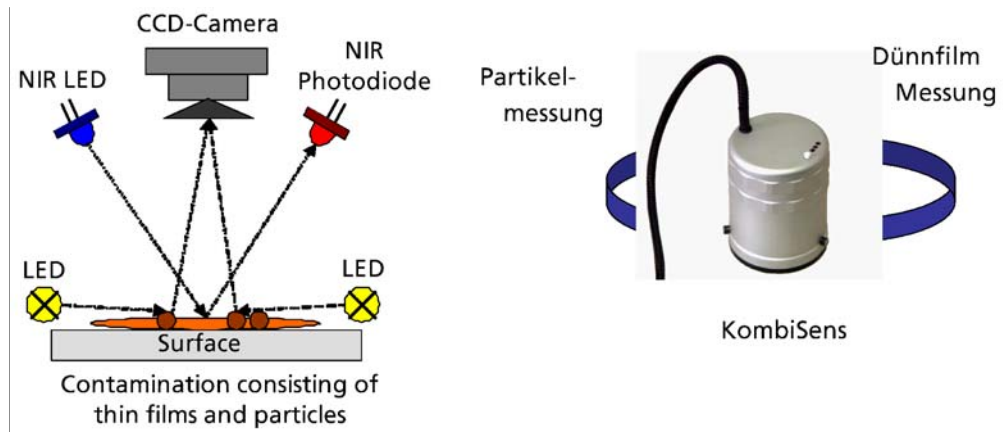


Bild 3.3: KombiSens: Kombination aus Dünnschicht- und Partikelsensor

3.4 Anwendungsbeispiele

Der einfache Verschmutzungssensor kann als Signalgeber für automatisierte Reinigungsprozesse eingesetzt werden und eine Maschine oder Fördereinrichtung überwachen. Ab einem definierten Kontaminationsgrenzwert kann dann ein Reinigungsprozess ausgelöst werden (Bild 3.4).



Bild 3.4: Roboterintegriertes Greif- und Prüfsystem

In dem oben gezeigten Beispiel wurde der Sensor in einen Robotergreifer integriert (s. Bild 3.5), mit dem Metallteile in einem Prozessschritt geprüft, sortiert und palettiert werden können. Vorgeschaltet ist in diesem Fall ein Bildverarbeitungssystem, das ein auf dem Band zugeführtes Teil lokalisiert und den Greifer entsprechend positioniert. Die Prüfung findet während des Greifvorgangs statt und die Teile werden dem Prüfergebnis entsprechend zur Weiterverarbeitung palettiert oder einem weiteren Reinigungsdurchlauf zugeführt.

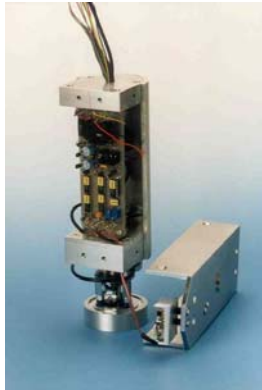


Bild 3.5: Robotergreifer mit integriertem Sensor

Dieses Beispiel demonstriert die einfache Sortierung in Gut-Schlecht-Teile. Ein weiterer Automatisierungsschritt könnte darin bestehen, die Messwerte des Sensors als kontinuierliche Regelgröße in den Prozess zurückzuführen und damit einen geschlossenen Regelkreis zu realisieren, um z.B. die Dauer eines Reinigungsbades oder die Dosierung von Reinigungsmitteln zu regeln.

4 NIR-Kamerasysteme

4.1 Funktionsweise

Im Falle von größeren zu prüfenden Flächen und niedrigeren Anforderungen an die zu erkennende Schichtdicke, bieten sich NIR Kamerasysteme zur Detektion an. Derartige Kameras funktionieren im Prinzip wie herkömmliche Kamerasysteme im sichtbaren Bereich. Jedoch wird das Licht durch ein Prisma gefiltert, wodurch das NIR Licht auf einem CCD-Sensor aufgenommen wird. Dadurch lassen sich nicht nur Verschmutzungen auf Oberflächen sichtbar machen, die dem menschlichen Auge oder herkömmlichen Methoden der Bildverarbeitung bisher verschlossen sind. Bei organischen Objekten oder Stoffen kann sogar bis zu einem gewissen Grad unter die Oberfläche gesehen werden.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich hier auch durch eine simultane Aufnahme von sichtbarem und NIR Licht um eine möglichst große Fehlerpalette erkennen zu können. Hierfür existieren bereits entsprechende Kameras für kombinierte Bildaufnahmen (Bsp.: 2-CCD Kamera Technologie von JAI).

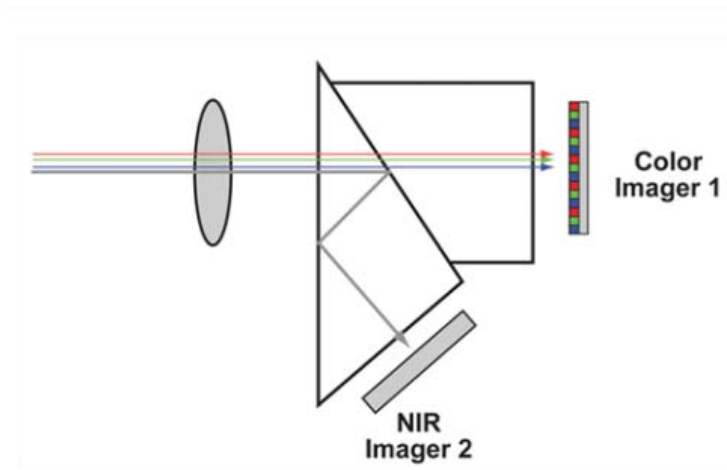


Bild 4.1: Prinzipieller Aufbau eines 2-CCD-Sensors für NIR und RGB Aufnahmen

4.2 Anwendungsbeispiele

Bei der Prüfung von Stoffen und Textilien bietet sich eine kombinierte Prüfung im NIR und sichtbaren Spektralbereich mit entsprechenden Kamerasystemen an. Qualitative Fehler im Farbstoff können im NIR Bereich erkannt werden, auch wenn sie optisch dem Stoff sehr ähnlich sind oder durch saubere Stoffschichten verdeckt sind (Bild 4.2).

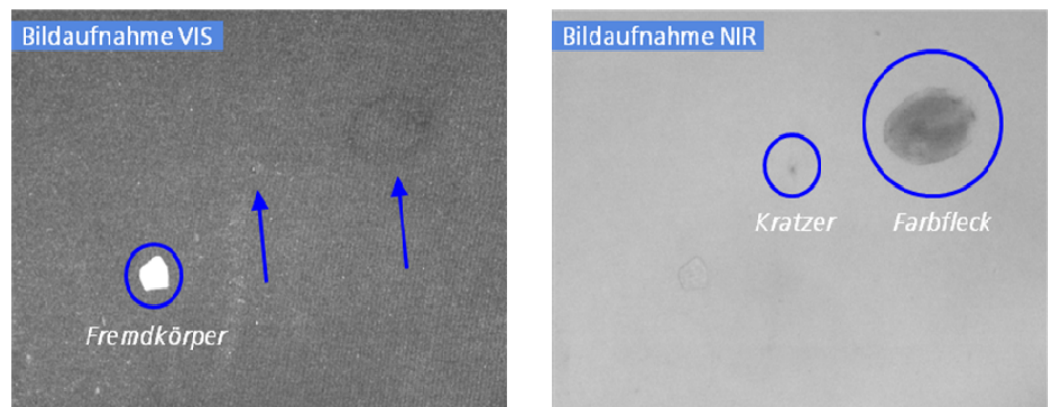


Bild 4.2: Schwarzes Polyester mit verschiedenen Fehlern

5 Ortsaufgelöste NIR-Spektroskopie

Die ortsaufgelöste Spektroskopie im nahen Infrarot ist eine Erweiterung der einfachen Prüfverfahren, welches das Potenzial besitzt, prozessintegriert Verunreinigungen oder technische Hilfsstoffe flächenhaft mit hoher Auflösung zu erkennen und zusätzlich auch die Art der Verunreinigungen festzustellen.

5.1 Messprinzip der Ortsaufgelösten NIR-Spektroskopie

Mit dem hier eingesetzten ImSpector der Firma Zeutec, Rendsburg, in Kombination mit einer Infrarotkamera können das optische Spektrum und gleichzeitig die Ortsinformationen einer Prüffläche ermittelt werden (Bild 4.1). Mit dem ortsaufauflösenden Spektroskop wird nicht wie bei konventionellen Spektroskopen ein einzelner Punkt, sondern eine Linie auf der Oberfläche aufgenommen und spektral analysiert. An jedem Punkt der Linie wird die Strahlung in die Nahinfrarot-Spektren zerlegt. In der Kamera entsteht somit ein zweidimensionales Bild der Linie, wobei die Ortsinformationen in den Spalten und die spektralen Informationen in den Zeilen des Bildes enthalten sind. Wird das Prüfobjekt zeilenweise aufgenommen, entsteht eine flächenhafte Abbildung, in der für jeden Bildpunkt die spektralen Informationen zur Verfügung stehen und ausgewertet werden können (Bild 4.2).

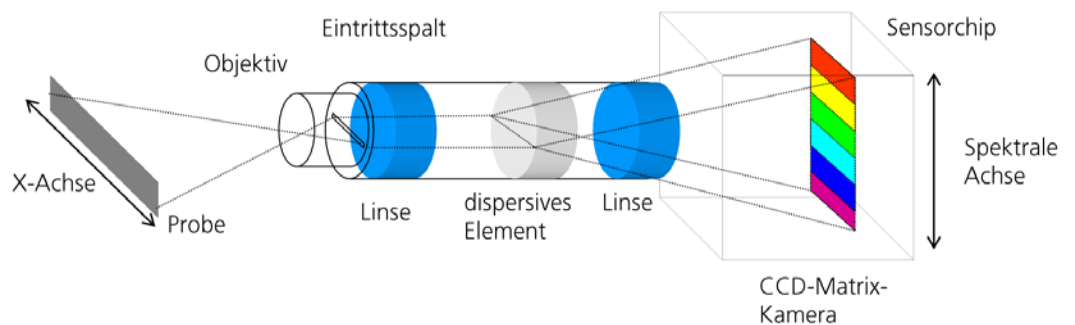


Bild 5.1: schematischer Aufbau des ortsaufauflösenden Spektroskops

Diese Spektroskope sind in verschiedenen Wellenlängenbereichen für UV, sichtbares Licht und NIR von 200nm bis 2500nm erhältlich. Der Wellenlängenbereich ist abgestimmt auf einen InGaAs (Indium Gallium Arsenid)-Sensor, der hier mit einer Auflösung von 320x256 Pixel zum Einsatz kommt.

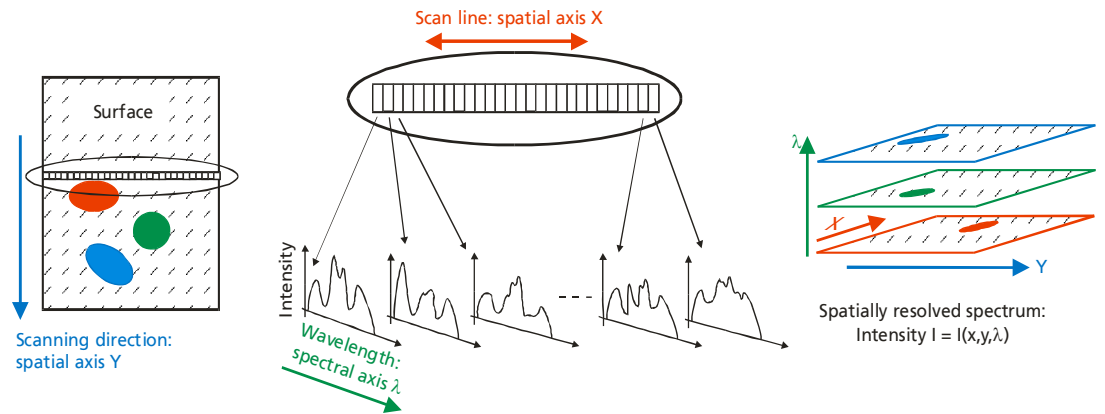


Bild 5.2: Aufnahme ortsaufgelöster Spektren

5.2 Kalibrierung und Datenvorverarbeitung

Die in dem NIR-Sensor eingesetzten InGaAs-Detektoren weisen prinzipbedingt ein wesentlich höheres Rauschen auf als z.B. CCD-Detektoren. Ebenso weist die Empfindlichkeit der Einzelpixel weit höhere Streuungen auf. Bedingt durch die Fertigungstechnik muss zudem eine gewisse Anzahl von fehlerhaften Pixel in Kauf genommen werden. Um auswertbare Spektren zu erhalten, ist daher eine Anzahl von Kalibrierschritten notwendig (Bild 4.3):

Um die unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Pixel zu kompensieren kann für jeden Pixel eine Kalibrierfunktion ermittelt werden. In diesem Schritt können auch die Fehlpixel festgestellt und ausmaskiert werden. Wenn nicht nur vergleichende Messungen zwischen Gut- und Schlechtteilen durchgeführt werden sollen, ist in einem weiteren eine Wellenlängenkalibrierung mit Standardstrahlern, wie z.B. Quecksilber-, Cadmium- oder Xenonlampen zu empfehlen. Soll zudem bei der Datenauswertung die Größe z.B. von kontaminierten Bereichen vermessen werden, ist eine geometrische Kalibrierung der Ortsachsen des Sensors mit geometrischen Normalen, wie z.B. Endmaßen, Einstellringen oder Glasmaßstäben notwendig. Die Messwerte des kalibrierten Systems weisen noch immer Rauschanteile auf und können durch veränderliche Beleuchtungsbedingungen beeinflusst werden. Um diese Einflüsse zu minimieren können beispielsweise Normalisierungen, Filterverfahren oder Mittelung mehrerer Aufnahmen durchgeführt werden, wodurch die Schwankungen in gewissen Grenzen kompensiert werden können.

Das System sollte also auf den jeweiligen Einsatz eingerichtet und kalibriert werden. Jedoch ist für die Anwendung im Prinzip nur die Kamera mit Spektrograph, eine einfache Beleuchtungsquelle (z.B.: Halogenlampen) ein handelsüblicher Computer und ein lineares Handhabungssystem (z.B. Linearachse oder Förderband) nötig, um Oberflächen zu analysieren. Das System kann somit sehr einfach in einen laufenden Prozess integriert werden.

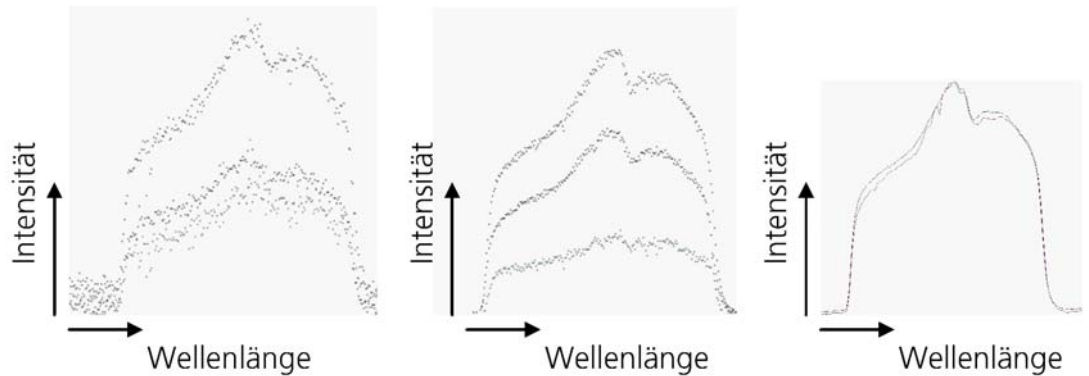


Bild 5.3: Vorverarbeitung und Kalibrierung der Spektren (schematisch) – Links: Rohdaten; Mitte: kalibrierte Spektren; Rechts: normalisierte Spektren

5.3 Auswertung der Messdaten

Welche Verfahren zur Auswertung der Messdaten herangezogen werden, hängt naturgemäß sehr stark von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Grundsätzlich müssen vier Schritte zur Auswertung ausgeführt werden:

1. Ermittlung von Referenzspektren von sauberen Oberflächen
2. Ermittlung geeigneter spektraler Absorptionsbereiche oder charakteristischer Merkmale der zu prüfenden Substanzen.
3. Klassifizierung der Spektren einer zu prüfenden Oberfläche durch Abgleich mit Merkmalen von sauberen Referenzspektren
4. Die Segmentierung der verschiedenen Bereiche in der Aufnahme.

In dem hier vorgestellten Verfahren wird zuerst eine saubere Referenzoberfläche spektral analysiert. Im Idealfall reflektiert die Oberfläche total, so dass die saubere Oberfläche dem Spektrum der benutzten Lichtquelle entspricht. Hat die Oberfläche ebenfalls absorbierende Eigenschaften, so muss dies bei der Auswertung berücksichtigt werden. Es empfiehlt sich hierbei auch größere Flächen der Referenzoberfläche zu scannen, um eventuelle Störeinflüsse wie Unebenheiten oder kleine Kratzer zu kompensieren.

Nachdem die saubere Oberfläche referenziert wurde, müssen Merkmale extrahiert werden. Eine einfache Möglichkeit bietet hierfür die Principle Component Analysis (PCA), welche die hochdimensionalen Daten mit Hilfe einer Hauptachsentransformation auf wenige Komponenten reduziert. Die PCA kann je nach Vorkenntnis über die zu erwartenden Verschmutzungen auf das gesamte Spektrum oder spezielle Wellenlängenbereiche zur Merkmalsgewinnung angewendet werden. Mit Hilfe der neuen Hauptvektoren können die Spektraldaten (bei der hier verwendeten Kamera 256 Spektrendaten pro Oberflächenpunkt) auf ca. 1-3 Werte reduziert werden.

Wird nun eine unbekannte Oberfläche analysiert, so werden auch hier die entsprechenden Merkmale ermittelt. Durch Abgleich der ermittelten Merkmale mit denen der Referenzoberfläche kann nun auf bestimmte Substanzen mit charakteristischen Absorptionseigenschaften geschlossen werden. Für diese Auswertung stehen im Prinzip sämtliche in der Spektroskopie und der digitalen Bildverarbeitung eingesetzten Verfahren zur Verfügung. In Fällen, in denen große Unterschiede zwischen den Spektren von sauberen und kontaminierten Bereichen auftreten und nur eine Gut-Schlecht-Aussage gewünscht wird, können einfache Schwellwerte oder lineare Klassifikatoren in den relevanten Spektralbereichen schon als Unterscheidungsmerkmal ausreichen. Alternativ müssen aufwendigere Klassifikationsmethoden wie beispielsweise Neuronale Netze oder Support Vector Machines eingesetzt werden.

Bild 5.4 zeigt beispielhaft die Absorptionsbereiche aufgenommenen Spektren von Silikon (blau) und Klebstoff (rot) auf einer Kunststoffoberfläche.

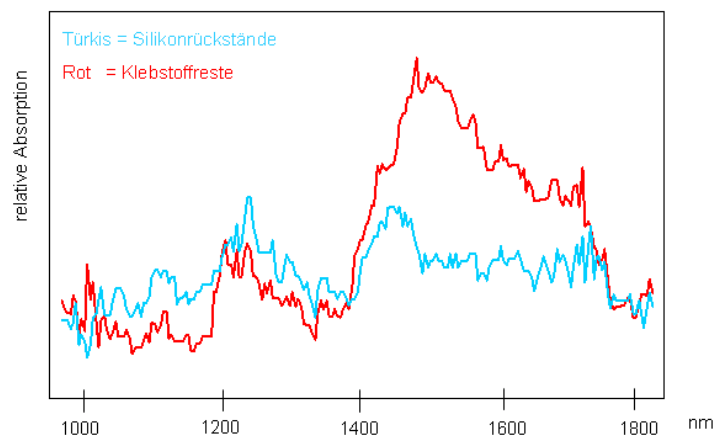


Bild 5.4: Absorptionsbereiche von Klebstoff und Silikon

Um diese Substanzen auf technischen Oberflächen nachzuweisen, wird die Oberfläche abgescannt und die Spektren Zeile für Zeile nach dem beschriebenen Verfahren ausgewertet. Bild 5.5 zeigt die ersten 2 Hauptkomponenten der PCA-transformierten Spektren.

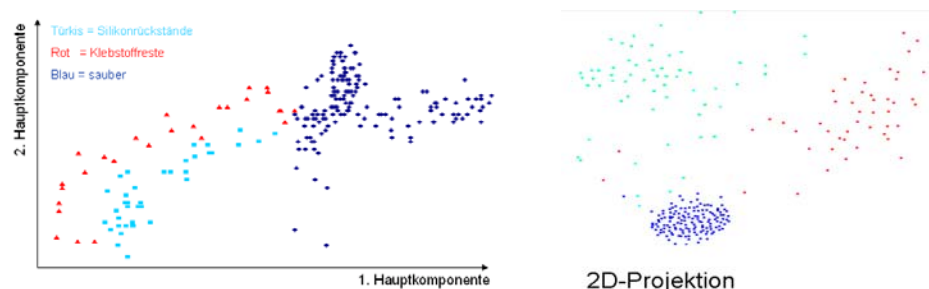


Bild 5.5: PCA-Analyse (links) und LVQ-Analyse (rechts) von Klebstoff und Silikon

Mit Hilfe der generierten Merkmale kann die Oberfläche Punkt für Punkt ausgewertet werden. Bild 5.6 zeigt eine Visualisierung der Oberfläche nach der

spektralen Analyse der in Bild 5.4 dargestellten Verschmutzung. Das linke Bild zeigt die Aufnahme im sichtbaren Bereich (die rechte Verschmutzung sind Klebstoffreste, die linke Silikonrückstände). Beide Stoffe sind im optisch sichtbaren Bereich schwer zu erkennen und kaum zu unterscheiden. Durch die spektrale Auswertung können die beiden Komponenten jedoch klassifiziert werden.

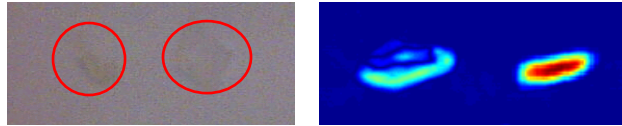


Bild 5.6: Links: Optisch kaum zu erkennende transparente Kontaminationen auf einer Kunststoffoberfläche.
Rechts: Visualisierung der spektralen Analyse der Verschmutzungen (rechts Klebstoff, links Silikon)

5.4 Anwendungsbeispiele

Der Einsatz der ortsauflösenden Spektroskopie bietet hier weitergehende Möglichkeiten, da die Substanzen nicht nur erkannt sondern auch identifiziert werden können (Bild 5.7).



Bild 5.7: Versuchsaufbau zur Prozessintegration der orts aufgelösten NIR-Spektroskopie

Als Einsatzgebiet kommt deshalb für diese Verfahren nicht nur der Nachweis unerwünschter Kontaminationen in Frage sondern es kann ebenso das Vorhandensein und die Beschaffenheit von Medien geprüft werden, die für den jeweiligen Fertigungsprozess notwendig sind. Mögliche Anwendungen ergeben

sich bei vielen Fertigungsprozessen über die gesamte Fertigungskette. Die soll exemplarisch an der Pulverbeschichtung dargestellt werden:

- Nach der Fertigung der zu beschichtenden Teile müssen diese gereinigt werden. Die Überprüfung der Sauberkeit der Teile kann durch eine NIR-Prüfung realisiert werden. Hierbei wird die Oberfläche auf Rückstände von unerwünschten Stoffen geprüft.
- Vor dem Beschichten ist eine gleichmäßige Auftragung des Pulvers notwendig. Auch hier kann das gleichmäßige Auftragen durch einen NIR-Scan kontrolliert werden, indem Fehlstellen detektiert werden.
- Nach dem Beschichtungsprozess (noch bevor die Schicht aushärtet), kann die Oberfläche auf Blasenbildung oder Fehlstellen kontrolliert werden.

Neben der technischen Sauberkeit und der Analyse von Schichten bieten sich weitere Aufgabengebiete bei der Kontrolle von Beschaffenheit, Vollständigkeit von Medien an. Zu denken ist hierbei beispielsweise an Klebstoffaufträgen, Kunststoffdichtungen oder die Überprüfung von Flüssigkeiten und Füllständen in lichtdichten Flaschen.

6 Vergleich der Prüfverfahren

Die Prüfverfahren zeichnen sich alle durch einen relativ einfachen Aufbau und einer berührungslosen Messung aus. Dadurch ist bei beiden Verfahren eine schnelle und unkomplizierte Integration in nahezu jeden Fertigungsprozess möglich.

Die Prüfverfahren mit einer punktförmigen NIR-Diode werden durch eine hohe Genauigkeit charakterisiert, welche jedoch durch einen sehr kleinen Messbereich erkauft wird. Durch die einfache Schwellwertauswertung ist zudem keine nähere Analyse der Oberfläche möglich, sondern lediglich eine Ja/Nein Aussage zum Vorhandensein von Substanzen.

Mit der NIR Matrixkamera ist ebenfalls nur eine Ja/Nein Aussage möglich, jedoch auf einer größeren Fläche. Zudem existieren hier bereits Kameras für eine kombinierte Auswertung im NIR und sichtbaren Spektralbereich.

Die NIR-Spektroskopie bietet hier im Gegensatz zur Diode die Möglichkeit ein komplettes Spektrum der Oberfläche zu analysieren. Da bereits eine einfache Hauptachsentransformationen oder Schwellwertvergleiche an charakteristischen Spektralbereichen häufig gute Klassifikationen von Substanzen zulassen, sind auch bei diesem Verfahren einfache Auswertungen möglich. Zudem kann nicht nur ein Punkt, sondern eine ganze Linie, spektral analysiert werden. Nachteilig sind die prinzipbedingte Verschlechterung der Messgenauigkeit und die hohen Anschaffungskosten für die benötigte Hardware zu nennen.

Punktförmige NIR-Diode:

- + einfacher Aufbau und Integration in die Fertigungsumgebung möglich
- + hohe Genauigkeit bezüglich erkennbarer Schichtdicken
- + Preiswert
- + sehr schnelle und einfache Auswertung
- Größere Flächen müssen abgetastet oder mit mehreren Sensoren ausgewertet werden
- Nur gut/schlecht – Vergleich und graduelle Unterscheidung möglich da monochromatisch

NIR-Matrixkamera:

- + einfacher Aufbau und Integration in die Fertigungsumgebung möglich
- + Preiswert
- + sehr schnelle und einfache Auswertung möglich
- + Prüfung von größeren Flächen ohne Abtasten möglich
- Genauigkeit der zu erkennenden Substanzen Abhängig von Objektiv und Auflösung
- Nur gut/schlecht – Vergleich und graduelle Unterscheidung möglich da keine spektrale Auswertung

Bildgebende NIR-Spektroskopie:

- + einfacher Aufbau und Integration in die Fertigungsumgebung möglich
- + relativ schnelle Auswertung möglich
- + Analyse und Klassifikation der Oberfläche möglich
- + Inspektion größerer Flächen mit Matrixkamera
- relativ teure Hardware

- Genauigkeit bezüglich zu detektierender Schichten schlechter als beim Punktsensor ($>10 \mu\text{m}$)
- Fläche muss abgetastet werden

7 Ausblick

Die Untersuchung von Oberflächen ist in einem breiten Feld industrieller Anwendungen ein wichtiges Qualitätskriterium. Zurzeit beschränkt sich die Messtechnik zur Prüfung der Oberflächenreinheit aber hauptsächlich auf Laboranwendungen und subjektive Prüfungen. Mit den hier vorgestellten Entwicklungen können die Vorteile optischer Messverfahren auch zur Detektion und Identifikation von Substanzen eingesetzt werden, die im visuellen Bereich nicht sichtbar oder schwer zu unterscheiden sind. Diese Vorteile bestehen vor allem in der berührungslosen Messung, die ohne Probenpräparation und Prüfflüssigkeiten auskommt, und der damit gegebenen Möglichkeit zur Vorortmessung in Fertigungsprozessen.

Ein Hinderungsgrund für den Einsatz der orts aufgelösten NIR-Spektroskopie dürfte zurzeit noch im relativ hohen Preis für die Sensoren zu sehen sein. Weiterentwickelte Sensoren mit höheren Auflösungen, Messgeschwindigkeiten und geringeren Fertigungstoleranzen werden sicherlich zur schnelleren Verbreitung der orts aufgelösten NIR-Spektroskopie beitragen.

Für die Akzeptanz des Messverfahrens in der Industrie ist eine integrierte, einfach vom Benutzer konfigurierbare Software notwendig, die bei schnell wechselnden Anforderungen flexibel an die neuen Gegebenheiten angepasst werden kann. Der Einsatzbereich der orts aufgelösten Spektroskopie beschränkt sich aber nicht nur auf den nahinfraroten Bereich, so, dass mit einer Ausdehnung auf längere und kürzere Wellenlängenbereiche auch noch weitere Anwendungsfelder erschlossen werden können. Diese könnten dann auch in Kombination mit anderen Messverfahren ein System zur prozessintegrierten, umfassenden Qualitätssicherung komplexer Komponenten und Produkte bilden.