

## Online-Prozeßdiagnose am Beispiel einer PKW-Lackieranlage

Patrick Feucht, Torsten Zirzlaff, Dr. Oskar Leisin<sup>1</sup>, Prof. Dr. Rüdiger Dillmann  
Forschungszentrum Informatik an der Universität Karlsruhe  
Haid- und Neu-Str. 10-14  
D-76131 Karlsruhe  
Email: [feucht@fzi.de](mailto:feucht@fzi.de)

### Kurzfassung

Bei Fertigungsprozessen mit sehr hohen Werkstückkosten sollen Produktionsfehler online erkannt werden, um eine Serie von fehlerhaften Werkstücken zu vermeiden. Dieser Artikel beschreibt ein qualitatives Auswerteverfahren von über der Zeit aufgenommenen Meßdaten, das zur Diagnose eines Teilprozesses bei der Lackierung von PKW-Karosserien angewendet wird. Die Parametrisierung des Verfahrens wird über Lerndaten gelöst, was den industriellen Einsatz maßgeblich vereinfacht. Ein zur Zeit in der Produktion eingesetzter Prototyp bestätigt die erwartete Funktionalität des Verfahrens.

**Schlagwörter:** Beschichten, Online-Diagnose, Architektur, Fertigungsprozeß, qualitative Zeitreihenanalyse

## 1 Einleitung

Aufgrund der hohen Werkstückkosten bei PKW-Lackierprozessen sollen Produktionsfehler, die zu einer Serie von fehlerhaften Werkstücken führen, unbedingt vermieden werden. Ebenfalls soll die Weiterbearbeitung des Werkstücks im Fließbandprozeß sofort bei Auftreten einer Prozeßanomalie gestoppt werden, um die Nacharbeitungskosten möglichst gering zu halten (im Fall der PKW-Lackierung sind diese sehr kostenintensiv, da die Karosserie aufwendig repariert werden muß). Für diese Aufgabenstellung ist der Einsatz eines Online-Diagnosesystems erforderlich. Dieses soll anhand von Steuer- und Sensorsignalen der Maschinen online auf die Qualität der Lackierung schließen. Die indirekte Qualitätsmessung ist notwendig, da die direkt gemessenen Qualitätsdaten erst vorliegen, wenn die lackierte Karosserie den Trocknungsöfen verlassen hat. Dies bedeutet, daß Lackierfehler, die durch einen Maschinendefekt entstehen, frühestens nach ca. 45 Minuten erkannt werden würden.

Moderne PKW-Lackieranlagen besitzen die Möglichkeit, mehrere verschiedene Karosserientypen (ca. 10) mit unterschiedlichen Farben (ca. 20) zu lackieren. Dies erschwert die Maschinendiagnose dahingehend, daß die Steuer- und Sensorsignale immer im Kontext mit der aktuellen Anlagenkonfiguration zu untersuchen sind. In [Feucht98] wird eine hybride, hierarchische, modulare Systemarchitektur beschrieben, die mittels Zustandsautomaten eine Segmentierung des Gesamtproblems in Teilprobleme realisiert. Diese Segmentierung basiert auf den Steuerungssignalen, so daß der aktuelle Kontext der Anlage für die Diagnosefunktionen der einzelnen Segmente benutzt werden kann. Die auszuwertenden Daten sind von der Anlagensensorik über der Zeit aufgenommene Meßreihen. Je nach Segment besitzen diese eine Größe von 50-2000 einzelnen Meßpunkten. Prinzipiell können diese Daten mittels datenbasierten oder modellbasierten [Puppe96] Methoden ausgewertet werden. Eine Studie über datenbasierte Lösungen zur automatischen Diagnose [Schmidt96] des Lackierprozesses hat ergeben, daß die hierfür notwendigen vorklassifizierten Trainingsbeispiele sowohl quantitativ wie auch qualitativ nicht verfügbar sind. Die mangelnde Anzahl der Trainingsdaten hat ihre Ursache in den permanent andauernden Optimierungen der Lackieranlagen, die verhindern, daß repräsentative Daten im notwendigen Umfang zur Verfügung stehen. Die mangelnde Güte der vorklassifizierten Daten rührt daher, daß die Qualitätskontrolle der lackierten Karossen zum größten Teil aus einer visuellen subjektiven Prüfung der Karosserieoberfläche besteht und somit keine quantitativen Gütemaße zur Verfügung stehen.

Mathematische Modelle, mit denen eine residuenbasierte Diagnose [Füssel98] durchgeführt werden könnte, liegen nur vereinzelt vor und sind für die Anwendung auf die vorhandenen Meßgrößen zu komplex. Vielmehr erfolgt die momentane Auswertung der Steuer- und Sensorsignale durch erfahrene Anlagenexperten, die die Zeitreihen auf ihren qualitativen Verlauf [Schiller97] bewerten („Wenn das Versorgungsventil öffnet, muß der Drucksensor einen starken Druckanstieg anzeigen“). Die Expertenbewertung ist ein Abgleich der Form der Datenreihe mit ihrem physikalischen Grundwissen und ihrem Erfahrungswissen. Das Erfahrungswissen beruht auf Beobachtungen von Lackierprozessen, die ohne Beanstandung waren. Diese Vorgehensweise soll in eine Diagnosemethode abgebildet werden, um eine maschinelle Auswertung zu ermöglichen. Von [Büttner96] wurde hierzu ein Verfahren vorgestellt, das es dem Experten erlaubt, die Form der Zeitreihe mittels Prädikatenlogik zu beschreiben. Die Anwendung dieser Regeln auf die zu

---

<sup>1</sup> DaimlerChrysler AG, Werk Sindelfingen

diagnostizierenden Daten mittels eines PROLOG-Interpreters liefert dann das Ergebnis, ob sich eine Beziehung der beobachteten Datenreihe zu einer Referenzreihe ableiten läßt. Aufgrund der mangelnden Adaptivität dieses Verfahrens und des aufwendigen Erstellens der Regelbasis ist ein industrieller Einsatz dieser Methode in einem dynamischen Prozeß problematisch. Im folgenden stellen wir am Beispiel des Spülprogramms ein Verfahren vor, das sich vor allem durch seine einfache Wissensakquisition und Parametrisierung auszeichnet.

## 2 Diagnose von Spülprogrammen

Bei modernen Lackieranlagen können mit den Lackierautomaten mehrere Farben lackiert werden. Dies macht einen Farbwechsel notwendig, bei dem die vorhergehende Farbe aus dem Leitungssystem gespült wird. Die Korrektheit der ablaufenden Spülprogramme ist für das Lackierergebnis sehr wichtig, da Farbverschleppungen entstehen können, wenn noch Restbestände der alten Farbe in der Leitung sind. In [Feucht98] wurde das Konzept eines *Diagnoseknotens* vorgestellt, der mittels eines Baukastens erstellte Funktionsnetze kapselt. Zur Diagnose des Spülprogramms eines Zerstäubers wurde ein Diagnoseknoten parametrisiert, der einen Zustandsautomaten enthält. Dieser wird mittels der binären Ventilsteuerungen für die Verdünnung und die Pulsluft generiert (s. Binärfolgen in Abbildung 1, linkes Bild oben). Jedem Zustand des Automaten ist wiederum ein für diesen geeigneter Diagnoseknoten zugeordnet. Wir beschreiben in den folgenden Abschnitten eine Diagnosemethode, die eine kontextabhängige, qualitative Bewertung von analogen Meßreihen vornimmt. Das Signal, auf das die Methode angewendet wird, ist der statisch gemessene Druck in der Lackleitung aufgenommen über der Zeit. Nachfolgende Abbildung 1 veranschaulicht die mittels Zustandsautomaten erzeugte Strukturierung des Diagnoseproblems.

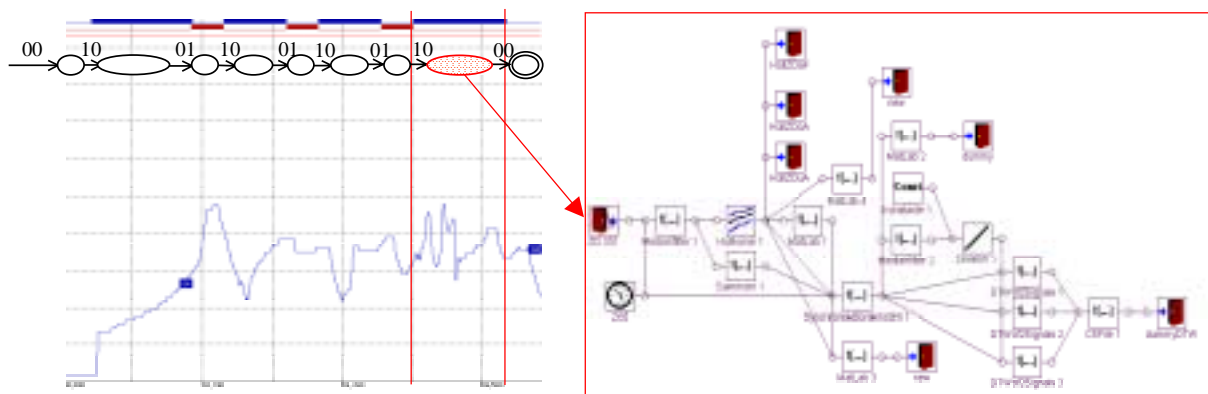


Abbildung 1 Zuordnung des Funktionsnetzes zum letzten Pulsluftintervall

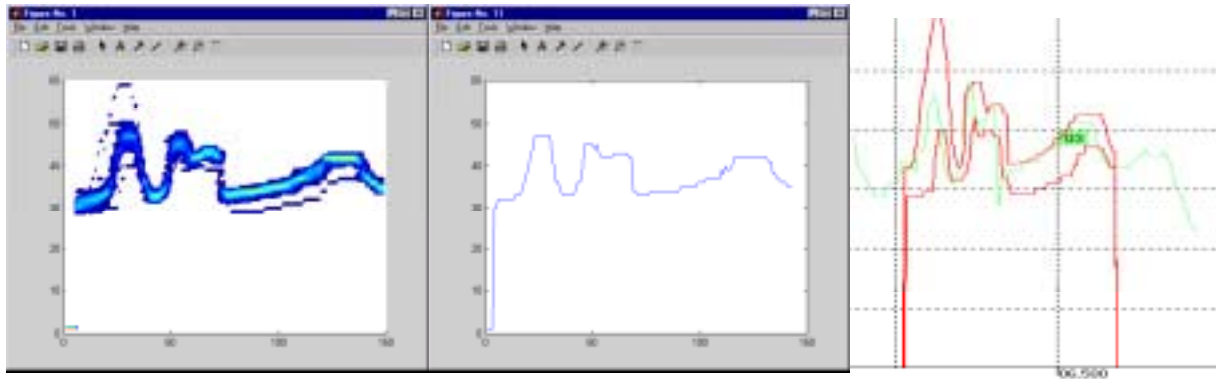
### 2.1 Methode zur Bewertung von Meßreihen

Da wie oben beschrieben eine qualitative Diagnose der Sensorsignale angestrebt wird und der prinzipielle Signalverlauf von Interesse ist, werden die Signale von impulsförmigen Störungen bereinigt. Um das Nutzsignal nicht zu verfälschen, verwenden wir hierzu Medianfilter (s. [Goll96]).

Ein weiterer Vorverarbeitungsschritt ist die Normierung des Wertebereichs der Sensorsignale auf das Intervall  $[0,1]$ . Dies ist notwendig, da verschiedene Farben aufgrund verschiedener Viskositäten verschiedene Signalniveaus erzeugen. Mit der Normierung wird das Verfahren invariant gegenüber der verwendeten Farbe und somit wird der Parametrisierungsaufwand erheblich verringert.

Für die Klassifikation der Zeitreihen werden selbige mit vorgegebenen verglichen. Für den Vergleich der Signaltemplates mit dem Testsignal ist ein geeignetes Abstandsmaß erforderlich. Hierzu eignet sich das Dynamic Time Warping [Sakoe78], wie es zum Beispiel in der Sprachverarbeitung verwendet wird. Dieses Verfahren normiert zunächst die zu vergleichenden Folgen. Bei dieser nichtlinearen Normierung werden die einzelnen Musterabschnitte in unterschiedlicher Form gestreckt oder gestaucht, wobei die dazu notwendige Verzerrungsfunktion durch einen direkten Vergleich mit dem Referenzmuster ermittelt wird. Eine Problematik beim Dynamic Time Warping sind unterschiedliche Längen der zu vergleichenden Muster. In [Myers80] wird daher vor dem Vergleich der Muster eine lineare Normierung auf eine einheitliche Länge vorgeschlagen. In unserem Fall löst der Zustandsautomat diese Problematik, da er nahezu gleich lange Zeitfolgen separiert. Eine weitere Problematik beim Mustervergleich ist die Vorgabe der Muster. In [Ruckhäberle95] wird hierzu eine Datenreihe in 9 Basissegmente zerlegt und daraus das Template aus einer geeigneten Aneinanderreihung dieser Segmente mittels des Levenshtein-Abstands berechnet. Da wir keine weitere Segmentierung der Zeitreihe anstreben, verfolgen wir, zugunsten eines genaueren

Abstandswertes, diesen qualitativen Ansatz nicht, sondern wählen die gesamte Druckreihe als Template. Für die Templategenerierung nutzen wir das Wissen des Anlagenexperten. Er kann über ein GUI visuell entscheiden, welche Drucksignalfolgen zur Templatebildung benutzt werden sollen. Die grafische, interaktive Wissensakquisition ist für den Benutzer sehr einfach zu bedienen, da er seine Entscheidungen nicht formalisieren muß, sondern seine visuelle Entscheidungsfähigkeit einsetzen kann. Mit den ausgewählten Datenreihen werden die Datenverteilungen für jeden Zeitpunkt berechnet. Hierzu wird der Wertebereich diskretisiert und die Anzahl der Datenpunkte in den jeweiligen Diskretisierungsintervallen bestimmt. Abbildung 2 links zeigt die Datenverteilungen über der Zeit, wobei die Färbungen der Anzahl der Datenpunkte in dem entsprechenden Diskretisierungsintervall entsprechen. Das Template ergibt sich aus der mediangefilterten Maximumskurve der Histogramme (s. Abbildung 2 mitte).



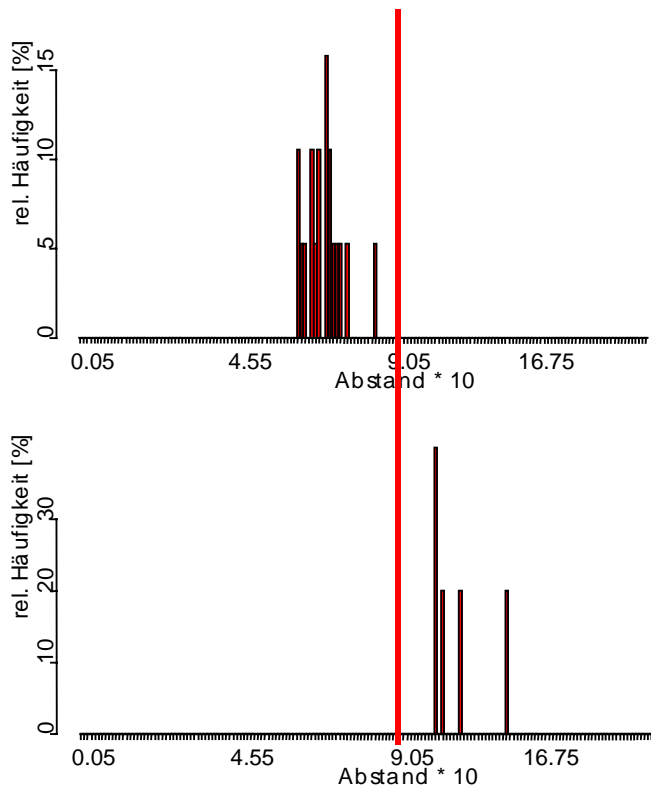
**Abbildung 2 Generierung von Templatreihen**

In Abbildung 2 rechts sind die obere und untere Hüllkurve eingezeichnet, die sich aus der Minimum- bzw. Maximumbildung für jeden Zeitpunkt der betrachteten Datenreihen ergeben. Eine Fehlerdiagnose mittels dieser Hüllkurven [Klein98] ist in unserem Fall nur bedingt geeignet, da eine Verschiebung der Zeitreihe, z.B. durch Toleranzen in den Ventilöffnungs- bzw. -schließzeiten, zu unerwünschten Fehlalarmen führen würde.

Zur Klassifikation des Abstandswerts einer Testreihe zum Template wird ein Schwellwert benutzt, bei dessen Überschreitung ein Fehler gemeldet wird. Zur Ermittlung dieses Grenzwertes werden die Abstandswertverteilungen von fehlerfreien (s. Abbildung 3 oben) und fehlerbehafteten (s. Abbildung 3 unten) Spülprogrammen berechnet. Der Schwellwert ergibt sich aus einer geeigneten Separierung dieser beiden Histogramme (s. Abbildung 3). Durch die gleitende Berechnung des Templates und der zugehörigen Datenverteilungen von den letzten 200 fehlerfreien Spülprogrammen lösen wir die oben beschriebene Problematik der permanent andauernden Änderungen der Prozeßbedingungen. Verändert sich dieses Histogramm dabei so stark, daß es nicht mehr disjunkt zu den Fehlerhistogrammen ist, müssen diese ebenfalls neu generiert werden (s. Abschnitt Experimente). Erst diese Adaptivität ermöglicht einen langfristigen Einsatz der Diagnosemethode in der Produktion, da nur bei Prozeßänderungen, die eine starke Auswirkung auf die Abstandswerte besitzen, eine Parametrisierung durch den Anlagenexperten vorgenommen werden muß.

### 3 Experimente und Ausblick

Im Rahmen des Entwicklungsprojekts QUASAR, das bei DaimlerChrysler im Werk Sindelfingen durchgeführt wird (s. [Leisin99]) erfolgte in einer Lackierstraße die Evaluierung der Diagnosemethode. Zur Generierung von Fehlerdaten, die zum Einlernen der oben beschriebenen Diagnosemethode notwendig sind, waren gesonderte Spülversuche erforderlich, da mittels der Qualitätsprüfung des Endprodukts keine Korrelation eines aufgetretenen Fehlers zu der verursachenden Maschine möglich ist. Dies bedeutet, daß aus der Produktion für das Teachen nur fehlerfreie Prozeßdaten als vorklassifizierte Trainingsdaten zur Verfügung stehen. In den Versuchsreihen haben wir gezielt Manipulationen an den am Spülprozeß beteiligten Komponenten vorgenommen. Anschließend wurden die Spülprogramme abgefahren und die Sensordaten mit dem Diagnosesystem PRIMAS, das von der Firma PRODATAS GmbH in Böblingen entwickelt wird, aufgezeichnet. Die Verteilung der Abstandswerte für diese Daten sind in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3 Datenverteilungen der Template-abstandswerte für fehlerfreie (oben) und fehlerbehaftete Spülprogramme**

Der Fehler, der zum im unteren Bild dargestellten Histogramm führte, war ein simulierter abgeknickter Schlauch der Verdünnungszufuhr. Wie durch die eingezeichnete Linie deutlich wird, kann er mittels einer einfachen Schwellwertabfrage erkannt werden.

Der nächste Schritt wird sein, das Verfahren online in der Produktion einzusetzen. Angestrebt wird hierbei die Integration der Fehlerdetektion in die Steuerungssoftware, die dann je nach Art des Fehlers entweder eine Anpassung der Prozeßparameter für den Spülvorgang vornimmt oder bei einmalig auftretenden Prozeßstörungen das Spülprogramm wiederholt. Der Einsatz in der Produktion würde dann auch eine fortlaufende Dokumentation der Prozeßschwankungen ermöglichen und somit zu einem tiefergehenden Prozeßverständnis bei den Anlagenexperten beitragen. Dieses Wissen wäre sowohl für die Prozeßoptimierungen als auch für die Inbetriebnahme neuer Lackieranlagen wertvoll, da dadurch mögliche Fehler in der Farbwechseltechnik bekannt sind und somit von vornherein vermieden werden können. Eine weitere Aufgabe stellt sich uns in der Übertragung dieser Methode auf andere Prozesse, wie z.B. die Lackzerstäubung.

## 4 Literaturverzeichnis

- [Büttner96] J. Büttner, „Integrierte Signalbewertung zur prozeßnahen Qualitätssicherung“, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20 Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 209, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996
- [Feucht98] P. Feucht, R. Suna, O. Leisin, M. Deck, „Interaktiv lernende Diagnosesysteme für industrielle Anwendungen“, Beiträge zum 3. Cottbuser Workshop „Aspekte neuronalen Lernens“, 1998
- [Füssel98] D. Füssel, „Residuenbasierte Fehlererkennung und Diagnose an komplexen Prozessen“
- [Goll96] K. Gollmer, „Prozeßdiagnose mit Mitteln der Mustererkennung und Anwendung in der Biotechnologie“, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8 Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik Nr. 589, VDI-Verlag, Postfach 10 10 54, 40001 Düsseldorf, 1996
- [Klein98] U. Klein, „Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen“, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1998
- [Leisin99] O. Leisin, „Diagnose, Optimierung, Überwachung und Regelung von Lackieranlagen“, Jahrbuch für Lackierbetriebe 2000, Vincentz-Verlag Hannover, 1999
- [Myers80] C. Myers, L. Rabiner, A. Rosenberg „Performance Tradeoffs in Dynamic Time Warping Algorithms for Isolated Word Recognition, IEEE Trans. On Acoustics, Speech and Signal Processing, ASSP-23, S. 263-271
- [Puppe96] F. Puppe, Wissensbasierte Diagnose- und Informationssysteme, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996
- [Ruckhäberle95] M. Ruckhäberle, „Strukturelle Analyse von Signalverläufen zur Diagnose von Verbrennungsmotoren“, VDI-Verlag, Postfach 10 10 54, 40001 Düsseldorf, 1995
- [Sakoe78] H. Sakoe und S. Chiba, „Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition, IEEE Trans. On Acoustics, Speech and Signal Processing, 26 S. 43-49, 1978
- [Schiller97] F. Schiller, „Diagnose dynamischer Systeme auf der Grundlage einer qualitativen Prozeßbeschreibung“, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8 Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik Nr. 653, VDI-Verlag, Postfach 10 10 54, 40001 Düsseldorf, 1997
- [Schmid97] D. Schmid, K. P. Huber, M. Berthold, O. P. Leisin, F. Leonards, Regelextraktion aus extrem großen Datenmengen mittels Neuro-Fuzzy-Lernverfahren, Technischer Bericht, Institut für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz an der Universität Karlsruhe, 1997