

# Vorausschauende Instandhaltung mit datengetriebener Zustandsüberwachung – Teil 1

von **Hartmut Steck-Winter, Carsten Stölting, Günther Unger**

Die Zustandsüberwachung für Thermoprozessanlagen in der Fabrik der Zukunft ist datengetrieben. Aus den massenhaft erfassten Daten lassen sich Muster und Trends extrahieren, die Schlüsse über den Abnutzungszustand auch von Bauteilen zulassen, für die es keine Condition-Monitoring-Sensoren gibt. Ziel ist es, bereits vorhandene Daten auch für die Lebensdauerprognosen von wichtigen Bauteilen zu nutzen, von Inspektionen weniger abhängig zu werden und eine vorausschauende Instandhaltung zu ermöglichen. Im ersten Teil des Beitrags wird ausgeführt, welche Prinzipien der datengetriebenen Zustandsüberwachung zugrunde liegen und welche Bauteile im Zentrum des Interesses liegen. Aus den Praxisbeispielen wird deutlich, welches Potenzial in der Digitalisierung der Zustandserfassung liegt.

## Predictive maintenance with data-driven condition monitoring – part 1

Condition monitoring for thermoprocessing plants in the factory of the future is data-driven. From the data collected in large numbers, patterns and trends can be extracted which allow conclusions about the wear condition of components for which no condition monitoring sensors are available. The objectives are to use existing data for remaining life time prognosis for important parts and make the condition assessment less dependent on inspections and thus to pave the way for a predictive maintenance of components in and on thermoprocessing plants. The first part of the article explains the principles of data-driven condition monitoring and which components are at the centre of interest. In practical examples, it is shown which potential data driven condition monitoring includes.

Neue datengetriebene Methoden der Zustandsüberwachung werden schon bald eine vorausschauende Instandhaltung ermöglichen und die Art und Weise, wie wir Abnutzung und Verschleiß überwachen, revolutionieren. Es geht dabei um Bauteile, für die es keine Condition-Monitoring-Sensoren gibt, also Bauteile mit periodischer Instandhaltung und Bauteile, deren Zustand bei einer Inspektion erhoben wird<sup>1</sup>.

Treiber ist die Vision von der nahezu aufwandslosen Zustandsüberwachung als Nebenprodukt der Sensoren der Automatisierungstechnik. Ziel ist es, Verfahren zur

Zustandsüberwachung zu entwickeln, welche die bereits vorhandenen Daten auch für die Zustandsüberwachung hochwertiger Bauteile nutzen.

In dieser Vision spiegelt sich der Wunsch vieler Anlagenbetreiber wider, ohne viel Zutun, nur auf Basis von Daten, die im Anlagenbetrieb erzeugt werden, Rückschlüsse auf den Abnutzungszustand zu ziehen, den Abnutzungsvorrat möglichst vollständig auszunutzen und trotzdem keine Ausfälle zu riskieren.

Das Prinzip ist so einfach wie bestechend: Ist einmal der Gutzustand anhand von Datenmustern definiert, dann deuten Abweichungen von diesen Mustern auf Veränderungen hin. Wird eine Abweichung erkannt, kann der weitere Verlauf mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit

<sup>1</sup> Die zustandsabhängige Instandhaltung und das Condition Monitoring mit festinstallierten Sensoren wurden bereits in früheren Fachbeiträgen [2–3] behandelt

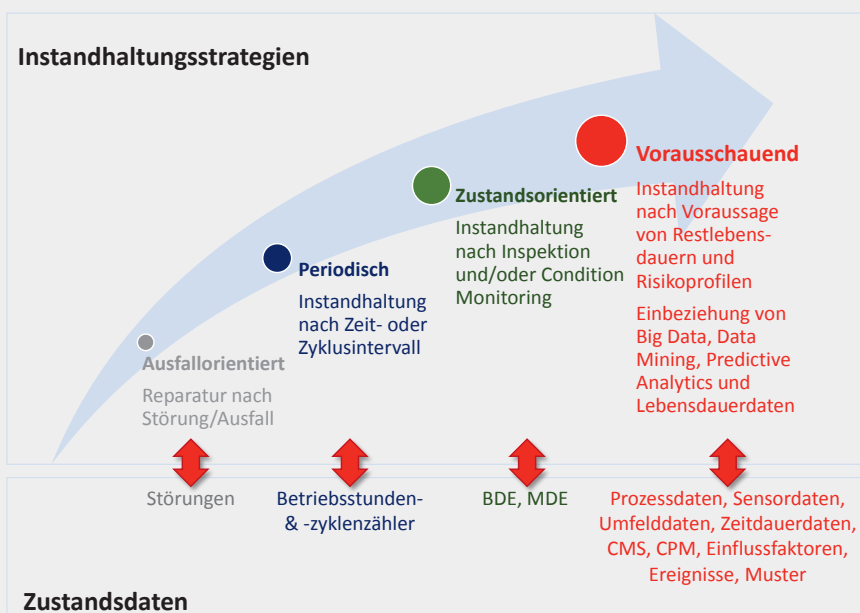


Bild 1: Schnittstelle Instandhaltungsstrategien und Zustandsdatenerfassung

vorhergesagt werden. Idealerweise können mithilfe der so gewonnenen Informationen Instandhaltungstermine optimaler geplant werden, so die Idee.

Der Kostenvorteil liegt auf der Hand. Dies umso mehr, weil auch Altanlagen<sup>2</sup> ohne überbordende Umbaukosten miteinbezogen werden könnten.

Wie die datengetriebene Zustandsüberwachung für Bauteile in und an Thermoprozessanlagen funktioniert und mit einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie zusammenwirkt, soll in diesem Beitrag beschrieben werden.

### GLIEDERUNG UND FRAGEN

Dieser Beitrag besteht aus zwei Teilen. Teil 1 behandelt die datengetriebene Zustandsüberwachung, also die Diagnostik. Teil 2 beschreibt deren Einbindung in eine vorausschauende Instandhaltung, also die Prognostik.

Insbesondere sollen im ersten Teil folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie wirkt die datengetriebene Zustandsüberwachung mit den Instandhaltungsstrategien zusammen?
- Welche Rolle spielen Condition-Monitoring-Sensoren?
- Welche Prinzipien liegen der datengetriebenen Zustandsüberwachung zugrunde?
- Kann die datengetriebene Zustandsüberwachung auch die dem Condition Monitoring nicht zugänglichen Bauteile im Ofen, z. B. die Ofenmauerung, miteinbeziehen?

<sup>2</sup> Mindestanforderung an Altanlagen sind eine SPS mit kurzer Zykluszeit und der Nachrüstmöglichkeit von Kommunikationsbaugruppen

## INSTANDHALTUNGS-STRATEGIEN

Die datengetriebene Zustandsüberwachung ist immer in eine Instandhaltungsstrategie eingebettet. Sie kann einen Beitrag zu allen präventiven Instandhaltungsstrategien leisten.

Die Instandhaltungsstrategien sind in DIN 13306 bzw. DIN IEC 60300 beschrieben. Darin wird in die präventive Instandhaltung, welche vor dem Ausfall stattfindet, und somit Wartung und Inspektion enthält, und in die korrektive bzw. reaktive Instandhaltung, welche nach einem Ausfall durchgeführt wird und die Instandsetzung beinhaltet, unterteilt.

Präventive Instandhaltungsstrategien (periodisch, zustandsorientiert und vorausschauend) haben zum Ziel, Funktionseinschränkungen zu vermeiden und die Ausfallwahrscheinlichkeit wichtiger Bauteile zu reduzieren.

Die Bauteilzustände bzw. die diese repräsentierenden Zustandsdaten sind, wie vereinfacht in **Bild 1** dargestellt, für alle Instandhaltungsstrategien von großer Bedeutung. Mit steigender Komplexität der Instandhaltungsstrategien werden auch die Zustandsdaten komplexer und umfangreicher, nicht zuletzt weil sowohl die Instandhaltungsstrategien als auch die Zustandsdaten aufeinander aufbauen.

### Reaktive ausfallorientierte Instandhaltung

Die reaktive Instandhaltungsstrategie ist und bleibt bei aller Prävention unersetzlich. Manchmal kommt es nämlich zu unerwarteten Ausfällen, auf die die Instandhaltung unmittelbar reagieren muss.

Solche Ausfälle können rein zufällig sein. Ein Zufallsausfall ist nach einer üblichen Definition ein Ausfall ohne systemische (und erkennbare) Ursachen. Fast alle Bauteile weisen während der Nutzungsdauer Zufallsausfälle auf [1]. D. h., dass auf eine ausfallorientierte Instandhaltung schon aus diesem Grund nicht verzichtet werden kann, weil sie dann die einzig mögliche Instandhaltungsstrategie ist. Gegen Zufallsausfälle gibt es (schon per definitionem) keine Prävention. Die einzig wirksame Maßnahme ist teure Redundanz. Zufallsausfälle sind sozusagen der Stachel im Fleisch der präventiven Instandhaltung. Es wird daher immer wieder die Frage gestellt, ob Zufallsausfälle durch Condition-Monitoring-Sensoren oder mit einer umfassenden Datenauswertung reduziert werden könnten. Es steht außer Frage, dass das, was uns heute noch zufällig erscheint, durch Mustererkennung wenigstens zu Teilen prognostiziert werden könnte.

Ausfälle werden aber auch oft durch Schwachstellen verursacht. Die Schnittstelle von der datengetriebenen Zustandsüberwachung zur reaktiven Instandhaltung umfasst daher insbesondere Störungsmeldungen für die Schwachstellenerkennung.

### Periodische Instandhaltung

Die periodische ist die älteste und vermutlich auch die am häufigsten verwendete präventive Instandhaltungsstrategie. Unabhängig vom Bauteilzustand, z. B. weil dieser nicht inspizierbar ist oder aber weil sich der Inspektionsaufwand nicht lohnt, werden die entsprechenden Bauteile bei einer Anlagenwartung periodisch, d. h. nach festen Zeit- oder Zyklusintervallen, ersetzt. Die Lebensdauer verkürzenden oder verlängernden Einflussfaktoren werden dabei meist nicht berücksichtigt.

Auch für die periodische Instandhaltung gilt daher, dass durch umfassende Datenauswertung das optimale Zeitintervall besser prognostiziert werden könnte. Die datengetriebene Zustandsüberwachung stellt hierfür Betriebsdauer- bzw. Betriebszykleninformationen und ggf. Lebensdauerdaten zur Verfügung.

### Zustandsorientierte Instandhaltung

Zustandsüberwachung ist der Kern und Namensgeber der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie. Sie basiert auf der Bestimmung von Abnutzungszuständen. Diese werden bewertet und ggf. Instandhaltungsmaßnahmen eingeleitet, bevor ein Schaden oder Ausfall eintritt. Dazu ist es erforderlich, für jede Bauteilfamilie ein Abnutzungsmodell aufzustellen, die Abnutzungsmerkmale zu bestimmen, für jedes Zustandsmerkmal eine Schadensgrenze festzulegen, den Abnutzungszustand regelmäßig zu inspizieren und nicht zuletzt bei jeder Inspektion eine Entscheidung zu treffen, ob bzw. wann das Bauteil präventiv ersetzt werden muss [2]. Ideal wäre jedoch eine zusätzliche Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer.

Die Zustandsüberwachung erfolgt meist durch Instandhalter und eher selten mit Condition-Monitoring-Sensoren. Die Beurteilung des Abnutzungszustandes liegt also im Ermessen des inspizierenden Instandhalters.

Die Schnittstelle zur datengetriebenen Zustandsüberwachung umfasst insbesondere Betriebs- und Maschinendaten.

### Auf dem Weg in eine vorausschauende Instandhaltung

Der Unterschied zwischen der zustandsorientierten und der vorausschauenden Instandhaltung erscheint zunächst marginal. Bei näherer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass geradezu ein Quantensprung erforderlich ist, weil die zu berücksichtigenden Zustandsdaten sehr umfangreich sind. Für die Lebensdauerprognosen und Risikoprofile muss mit

Big Data, Data Mining und Predictive Analytics sozusagen großes Geschütz aufgeföhren werden. Dies wird im zweiten Teil dieses Beitrags noch dargelegt.

### Die Kardinalfrage: Präventive Instandhaltung für welche Bauteile?

Allen Fragen vorangestellt ist aber die Frage, welche Bauteile im Zentrum des Interesses stehen sollten. Eine präventive Instandhaltung, egal ob periodisch, zustandsorientiert oder voraussagend, sollte sich immer auf Bauteile, deren Abnutzung oder Ausfall lange Stillstandszeiten, Qualitätseinbußen oder Geföhrdungen nach sich zieht und/oder hohe Kosten verursacht, konzentrieren. Diese betrifft alle Bauteile, die einen hohen Einfluss auf die Sicherheit, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Produktionsqualität der Anlage haben [2].

Solche Bauteile in und an konventionellen industriellen Thermoprozessanlagen sind:

- Bauteile im Ofen, z. B. Ausmauerungen, Gleitsteine, Muffeln, Kettenführungsschienen, Strahlrohre etc.
- Hochbelastete Bauteile am und im Ofen, z. B. Brenner, Gasumwölzer, Kontakteinrichtungen, Transportsysteme, Türen etc.
- Bauteile, deren Ausfall zu einem Sicherheitsproblem führen kann, z. B. Siphons, Wärmetauscher etc.

Hinzu kommen alle Bauteile, bei denen der Risikoverringungsbeitrag höher als der Aufwand ist. Kurz gesagt: Der Mehraufwand für die präventive Instandhaltung, egal nach welcher Strategie, muss sich rechnen.

### EXKURS: CONDITION-MONITORING-SENSOREN

Bevor wir uns nun voll und ganz der datengetriebenen Zustandsüberwachung zuwenden, noch ein Blick auf Condition-Monitoring-Sensoren (CMS). Obwohl es in diesem Beitrag, wie der Begriff „datengetrieben“ schon zum Ausdruck bringen soll, nur am Rande um CMS geht, spielen diese eine immer wichtiger werdende Rolle, die hier nur kurz angerissen werden soll.

Jeder, der sich mit Instandhaltung beschäftigt, kennt das Problem: zwei Instandhalter – drei Meinungen. Die Zustandsbewertung liegt nämlich im Auge des Betrachters. Etwas überspitzt könnte man dann auch noch sagen, dass Erfahrungswerte längst nicht so zuverlässig sind, wie wir gerne glauben.

CMS zur Zustandsüberwachung einer funktionalen Fähigkeit haben demgegenüber einen unschätzbaren Vorteil. Sie sind objektiv, immer aktiv, reagieren schnell und sind zuverlässig. Gemessen werden Abnutzungsmerkmale, z. B. Schwingungen<sup>3</sup>. Kennzeichnend für CMS sind

<sup>3</sup> In DIN ISO 17359, 2003 ist beispielhaft die Zuordnung von CMS zu Maschinen- bzw. Bauteilarten aufgelistet

zudem einstellbare Grenzwerte, die der Instandhaltung noch genügend Vorlauf für eine Instandhaltung geben, bevor das Bauteil ausfällt.

CMS sind heute bei keiner präventiven Instandhaltungsstrategie mehr wegzudenken. Typische handelsübliche CMS sind z. B. Schwingungs- bzw. Beschleunigungssensoren, Partikelsensoren für die Schmierölanalyse, Infrarotsensoren, Körperschallsensoren, oder Dehnungssensoren. Beispielhaft ist die Zustandsüberwachung von Wälzlagern in ausfallkritischen Bauteilen, bei denen eine Schadensfrüherkennung nur auf Basis von Schwingungsanalysen oder Metallpartikelanalyse des Schmierstoffs zuverlässig funktioniert.

Handelsübliche CMS sind allen anderen Zustandsüberwachungsmethoden technisch (funktionell) überlegen. Nachteilig an CMS sind besonders ihre vergleichsweise hohen Kosten. Daher auch der Entwicklungsdruck auf die sogenannte sensorlose Zustandsüberwachung, die bereits vorhandene Sensoren für die Zustandsüberwachung nutzt.

Die Einsatzmöglichkeiten von CMS für ausfallkritische Bauteile in Thermoprozessanlagen, z. B. für alle Bauteile im Ofen, werden zudem meist heillos überschätzt. Für diese Bauteile gibt es nämlich keine CMS. Es bleibt also eine strategische Lücke, die durch die datengetriebene Zustandsüberwachung geschlossen werden kann.

### SENSORBASIERENDE ZUSTANDSÜBERWACHUNGSMETHODEN OHNE CMS

Premiautomobile und Windenergieanlagen machen es vor. Bis zu 70 ohnehin vorhandene Sensoren und Geräte zeichnen laut Studien des Deutschen Instituts für Vertrauen und Sicherheit im Internet (DISVSI)<sup>4</sup> in modernen Kfz Informationen auf. Dazu gehören Außentemperatur, Fahrstrecken, Fahrstil, Fahrerwechsel, Geschwindigkeit, gefahrene Kilometer, Tageszeit, aber auch starkes Bremsen, Unfälle etc. Bei Windenergieanlagen sind es nicht viel weniger. Prognostiziert werden der Teileverschleiß und der optimale Wartungstermin.

Auch in modernen Thermoprozessanlagen werden viele Betriebsdaten zur Qualitätssicherung und Produktionsdatenerfassung aufgezeichnet, jedoch noch nicht für die Zustandserfassung genutzt. Selbst wenn, wären diese für eine vorausschauende Instandhaltung noch nicht genug. Nehmen wir uns das Kfz oder Windenergieanlagen zum Vorbild, geht es darüber hinaus auch um Maschinendaten, Ereignisse und Umfelddaten. Alle zusammen sind bei den weiteren Betrachtungen wichtig.

#### Prozessdatenvalidierung

Es gibt auch Beispiele aus dem Anlagenbau. Eine Zustandsüberwachung mit der bestehenden Instrumentierung ver-

folgt die Prozessdatenvalidierung (PDV) nach VDI 2048. Sie wird z. B. in Kraftwerken dazu eingesetzt, unzulässige Betriebszustände, z. B. Ventilleckagen, frühzeitig zu detektieren.

Prinzip und Ziel ist es, aus dem Zusammenwirken eines bekannten Funktionsmodells (Vergleichsmuster) mit der bestehenden Instrumentierung die aktuellen Messwerte zu validieren. Der Grundgedanke ist, als Ersatz für eine teure gerätetechnische Redundanz oder CMS eine sogenannte funktionale Redundanz zu schaffen und so eine Verbesserung sowohl der Wirtschaftlichkeit als auch der Sicherheit der Anlagen zu erreichen.

Das Prinzip der Prozessdatenvalidierung lässt sich auf die Bestandteile von Thermoprozessanlagen übertragen, weil auch in Thermoprozessanlagen Stoffströme zu- und abgeführt werden, die bilanziert und gemessen werden können [3]. In einem speziellen stationären Prüfmodus mit reproduzierbaren Bedingungen, z. B. im stationären Wochenendbereitstellungsbetrieb, können automatisch verschiedene kontrollierte Messungen, Prüfungen und Diagnosen durchgeführt werden, die mit den vorhandenen Sensoren auskommen.

Im Cybermodell eines Ofens können dann ein Gutmuster mit einem aktuellen Muster verglichen und Prozessanomalien detektiert werden. Zur Analyse der Prozessdaten können bewährte Methoden angewendet werden, z. B. minimale/maximale Änderungsgeschwindigkeit (Gradienten) oder Zeitdauern. Kurzgesagt, die Messwerte müssen mit dem „Gutmuster“ widerspruchsfrei sein. Wenn nicht, liegt entweder ein Messfehler vor oder die Stoffströme haben sich verändert, weil sich z. B. die Wärmedämmung der Ausmauerung oder der Wirkungsgrad eines Wärmetauschers verschlechtert hat.

Prozessdatenvalidierung ist schon deshalb ein vielversprechender Ansatz, weil es außer den Thermoelementen und ggf. Sauerstoff- oder Nitriersonden keine weiteren Sensoren im Ofenraum gibt, die Aufschluss über Bauteile im Ofen geben könnten.

#### Control Performance Monitoring

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Control Performance Monitoring (CPM), ein am Beginn seiner Entwicklung stehendes Teilgebiet des Condition Monitoring. CPM gibt Aufschluss über die Änderung des Verhaltens eines Regelkreises. Allen CPM-Methoden ist gemein, dass sie aus den vorhandenen Signalen eines Regelkreises Aussagen über dessen Performance ableiten [4].

Das Ergebnis des CPM sind Kennwerte, die Änderungen der Performance eines Systems indizieren<sup>5</sup>. Ein solcher Kennwert kann Hinweise darauf geben, dass sich das Regel-

<sup>4</sup> <https://www.divisi.de/>

<sup>5</sup> Beispielsweise der Harris Index oder der Setpoint Crossing Index, die beide eine Bewertung der Performance des Regelkreises in Form von Kennzahlen ausweisen

verhalten aufgrund unerwünschter Störeinflüsse verändert hat. Potenzielle Kennwerte sind z. B. der Stellgrad im stationären Zustand (Pausen-/ Impulsverhältnis) oder die PID-Sprungantwort auf Störgrößen. Aus dem Zeitverhalten eines Reglers bzw. der Stellgröße lassen sich Aussagen über schleichende Veränderungen der beteiligten Bauteile ableiten.

Um als Beispiel die Ofenbeheizung zu verwenden, bei höherem Stellgrad im stationären Zustand hat sich entweder die Wärmedämmung oder die Effizienz des Beheizungssystems verschlechtert oder die Temperaturmessung ist fehlerhaft. Der Wahrheitsgehalt dieser Aussagen kann dann spätestens bei der nächsten Inspektion überprüft werden.

Vergleichbar mit dem CPM für Regelkreise sind CPM-Prüfzyklen für die Steuerung, die ebenfalls mit der vorhandenen Instrumentierung auskommen.

### Umfeldsensoren

Obwohl Umfeldeinflüsse bekanntermaßen oft einen erheblichen Einfluss auf Produktionsqualität und auf die Funktionsfähigkeit der Anlage haben, werden diese meist nicht erfasst.

Umfeldsensoren, z. B. zur Messung von Abgastemperatur, Umgebungstemperatur, Erschütterungen (Beschleunigung), Geruch, Luftdruck, Luftfeuchte, Hallenluftzug, Temperaturhotspots, Lärm, Kohlenmonoxid, Verschmutzung und Verunreinigungen der Umgebungsluft, können für die vielfältigen Einflüsse des Produktionsumfelds herangezogen werden. Sie sind (vermutlich) wichtige Einflussfaktoren auf Abnutzung und Verschleiß und Frühindikatoren für sich anbahnende Schäden.

## DATENGETRIEBENE ZUSTANDSÜBERWACHUNG

In diesem Kapitel wird nun den beiden Fragen nachgegangen, was mit der datengetriebenen Zustandsüberwachung genau gemeint ist und ob diese die bisher dem Condition Monitoring nicht zugänglichen Bauteile im Ofen, z. B. die Ofenmauerung, miteinbeziehen kann.

Konkret geht es also um die Frage, mit welchen (möglichst vorhandenen) Sensoren und Parametern die Einflussfaktoren und der Abnutzungszustand kontinuierlich erfasst werden können [5–6]. Es geht um die Nutzung von Daten und Überwachungsmethoden der Automatisierungstechnik, hauptsächlich unter der Voraussetzung, dass sich Zeitdauern oder einfach messbare elektrische Größen einer Betrachtungseinheit (auch) „verschleißabhängig“ verändern oder aber charakteristische Ereignismuster auftreten. Dabei können Messungen auch indirekt erfolgen. Beispielsweise kann der Zustand der Gleitsteine im Ofen über die Schrittausführungsdauer und die Stromaufnahme des Durchstoßantriebs erfasst werden.

Die Kostenfrage spielt auch bei der Zustandsüberwachung eine wesentliche Rolle. Obwohl der Ausfall einer Thermoprozessanlage mit erheblichen Kosten einhergeht, sollen Maßnahmen zur Reduzierung möglichst wenig kosten<sup>6</sup>. Der bevorzugte Lösungsansatz ist daher Software, die nach ihrer Entwicklung sehr kostengünstig dupliziert werden kann.

Eine Zeitmessung kann i. d. R. ohne zusätzlichen Materialaufwand mit guter Genauigkeit mit der SPS erfolgen. Sie ist daher die erste Wahl. Für Asynchronmotoren ist Strommessung neben der Zeitmessung die bevorzugte ergänzende Methode. Andere, einfach messbare elektrische Größen sind z. B. Widerstandsänderungen von Elektroheizungen. Diese sind im Gegensatz zur Zeitmessung allerdings oft mit zusätzlichen Materialkosten verbunden.

Die Datenerfassung erfolgt mit der Betriebs- und Maschinendatenerfassung (BDE & MDE) und allen Sensoreingangsdaten in die SPS. Ereignisse, z. B. Stör- oder Positionsmeldungen, liefert die SPS ebenfalls ohne Materialmehraufwand. Erheblich komplexer ist allerdings deren Auswertung, weil sich der Informationsgehalt, wenn überhaupt, erst aus einem charakteristischen Datenmuster ergibt. Damit verbunden ist die Frage, ob sich die Relevanz der Daten schon vor der Datenanalyse bestimmen lässt, weil die gesuchten Ereignismuster erst bei der Analyse sichtbar werden. Big Data ist dann schon greifbar nahe.

Die Beherrschung der enormen Datenmengen, die erfasst und verarbeitet werden müssen, ist eine der großen Herausforderungen. Nur weil die Möglichkeit besteht, Daten bis ins kleinste Detail zu erfassen, heißt dies noch lange nicht, dass man dadurch einen Nutzen hat. Das größte Problem mit der Datenerfassung liegt aber eigentlich woanders. Wesentlich problematischer und vor allem aufwändiger ist nämlich die Zuordnung zu den jeweiligen Bauteilen.

Um die datengetriebene Zustandserfassung besser zu verstehen, muss man etwas tiefer in die Automatisierungstechnik einsteigen. Die in einer Thermoprozessanlage ablaufenden Prozesse werden entweder gesteuert oder geregelt.

### Zustandsüberwachung gesteuerter Bewegungsabfolgen

Kennzeichen für das Steuern ist, dass die Ausgangsgröße nicht auf sich selbst wirkt. Es gibt einen offenen Wirkungsablauf, der eine lineare zeitliche Bewegungsabfolge, Schrittausführungsdauer genannt, zur Folge hat. Im Betrieb ist die Schrittausführungsdauer von der Last und somit vom Schlupf des Asynchronmotors abhängig. D. h. tribologischer Verschleiß, der zu geringerer oder höherer

<sup>6</sup> Für Maßnahmen zur Ausfallreduzierung gibt es leider (noch) keinen garantierbaren ROI, weil nur die Ausfallwahrscheinlichkeit positiv beeinflusst werden kann

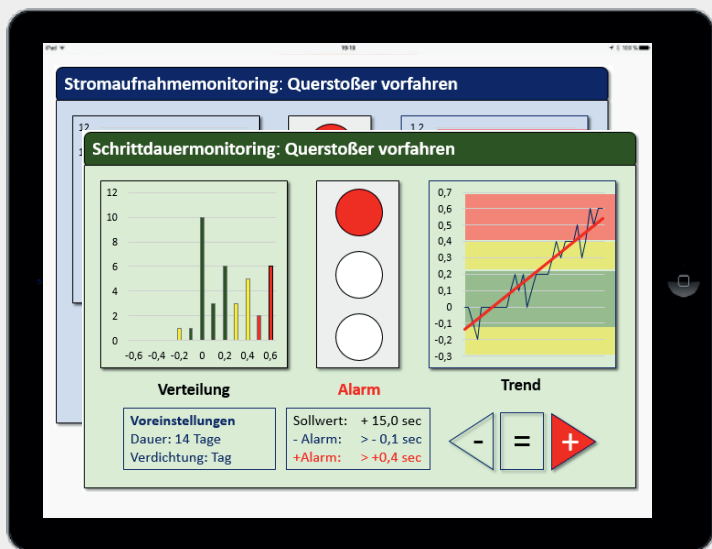


Bild 2: Schrittdauermonitoring

rer Belastung führt, lässt sich oft an Veränderungen der Schrittausführungsdauer und/oder der Stromaufnahme des Antriebsmotors erkennen und mit einem Schrittdauer- oder Stromaufnahmemonitoring auswerten.

Dazu werden, wie in **Bild 2** dargestellt, die Schrittdauern und/oder die Motorstromaufnahme jedes einzelnen Zyklus (Schritts) gemessen, die Streuungen gruppiert und der Trend seit der letzten Wartung aufgezeigt. Die Messungen werden dazu mit den aus der statistischen Prozesskontrolle bekannten Methoden verdichtet und ausgewertet. Die Alarmgrenzen werden aus der Verteilung automatisch bestimmt. Grenzwertüberschreitungen werden in einer Zustandsampel angezeigt.

Welche Bauteile des Antriebssystems für die Schrittdaueränderung ursächlich sind, kann das Monitoring nicht beantworten. Es gibt der Instandhaltung aber eine Vorwarnung für einen sich anbahnenden Verschleißausfall und liefert eine Messgröße für deren Zustand.

### Beispiel Dauerläufer

Ein Sonderfall des Steuerns, der allerdings häufig vorkommt, sind die sogenannten Dauerläufer, z. B. Gasumwälzer, Ölumwälzer, Pumpen oder Ventilatoren. Es gibt dann keinen zeitlich begrenzten Bewegungsablauf. Bei solchen Dauerläufern ist die Schwingungsüberwachung die bevorzugte Alternative der Zustandsüberwachung.

Lagerschwingungen sind aber nur manchmal das eigentliche Problem, sie sind oft nur eine Folge. Viel häufiger ist Verschleiß an den nur schwer inspizierbaren Laufrollen, z. B. durch Kavitation, der zur Unwucht führt. Sind beispielsweise über Keilriemen angetriebene Laufrollen

bereits mit einer Drehüberwachung ausgerüstet, dann kann in einem Prüfzyklus die Auslaufzeit nach dem Abschalten bis zum Stillstand gemessen werden. Alternativ dazu kann eine Stillstandsüberwachung eingesetzt werden. Sowohl schnellere als auch längere Auslaufzeiten können sowohl auf Veränderungen am Laufrad als auch auf sich anbahnende Schäden am Lager hinweisen. Die Diagnose und das Monitoring der Auslaufzeitschwankungen erfolgt ähnlich wie in Bild 2 dargestellt.

### Zustandsüberwachung geregelter Prozesse

Kennzeichnend für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungskreis des Regelkreises sich fortlaufend selbst beeinflusst. Geregelter Prozesse in Thermoprozessanlagen sind z. B. die Temperaturregelung oder die C-Pegelregelung.

Die Regeldifferenz als ein Maß für die Abweichung des Istwertes vom Sollwert ist der Auslöser eines dynamischen Energie- oder Massenstroms. Mit diesem wird die Regelgröße, z. B. die Temperatur, so beeinflusst, dass Soll- und Istwert möglichst schnell wieder übereinstimmen. Die Analyse der Signalverläufe, mit dem kurz beschriebenen CPM bzw. mit einer Prozessdatvalidierung, kann Aufschluss über Ausgleichzeiten, Energieaufwand und Änderungsgeschwindigkeiten geben.

### Beispiel Ofenwärmedämmung

Wahrscheinlich hat sich jeder Instandhalter von Thermoprozessanlagen schon einmal gefragt, ob bzw. wie man den Zustand der Ofenwärmedämmung von „außen“ beurteilen kann. Die häufigste Schlussfolgerung ist dabei, dass die Abnutzung der Wärmedämmung (z. B. hervorgerufen durch Dehnungsrisse und/oder Abtragungen) zu größeren Wärmeverlusten über die Ofenwand führt.

Dies kann im stationären Zustand mit leerem Ofen mit der CPM-Methode am höheren Stellgrad der Regelung zur Aufrechterhaltung der Solltemperatur gemessenen werden, weil das Pausen-/Impulsverhältnis der Heizung der Verlustwärme entspricht. Eine Prozessdatvalidierung führt möglicherweise zu noch sensibleren Ergebnissen. Ergänzend zum Stellgrad kann, wie in **Bild 3** dargestellt, auch die Abkühl- und Aufheizzeitdauer zwischen zwei Temperaturwerten exakt gemessen und miteinander validiert werden. Da solche Veränderungen aber gering sind und vielleicht sogar im Messwertersuchen untergehen, wird man das Ergebnis immer mit mehreren Messmethoden, z. B. einer weiteren Messung der Ofenwandtemperatur, absichern.

In **Bild 4** ist die praktische Umsetzung eines Wärmeverlust-Monitoring dargestellt, das indirekt Auskunft über den Zustand der Wärmedämmung eines Ofens gibt.

Bei sich verschlechternder Wärmedämmung verkürzt sich die Abkühlzeitdauer und die Wiederaufheizdauer steigt an.

Der Zeitunterschied wird also kleiner. In der Haltephase wird mit der CPM-Methode der Stellgrad gemessen, der ebenfalls ein Maß für den Wärmeverlust ist. Als vierte Messung kommt eine Messung der Ofenwandtemperatur hinzu. Die Frage, ob die Wärmedämmung nun ersetzt werden muss oder nicht, kann das Monitoring zwar nicht beantworten, es liefert aber eine Messgröße für den Zustand des Gesamtsystems Wärmedämmung.

Mit Anpassungen kann die Methode auf alle Systeme angewandt werden, deren Prozessgrößen in einer funktionellen Beziehung ( $x = f(y)$ ) zueinander stehen, also z. B. Wärmetauscher, bei denen die Ausgangstemperatur in einer funktionalen Beziehung zur Eingangstemperatur steht.

### Ereignisdaten und Ereignismuster

Bis hierhin ging es noch um bereits etablierte Instandhaltungsmethoden. Neu hinzu kommt nun die Mustererkennung. Die Möglichkeit der Mustererkennung aus großen Datenmengen ist einer der Treiber des Hypes um Big Data, Data Mining und Predictive Analytics. Was aber sind Ereignisdaten und Ereignismuster?

Mustererkennung ist, ganz allgemein ausgedrückt, die Fähigkeit in einer großen Menge von Daten Regelmäßigkeiten, Wiederholungen, Ähnlichkeiten oder Gesetzmäßigkeiten zu erkennen [7]. Typische, in diesem Zusammenhang genannte Aufgabenbereiche sind Text- und Bilderkennung, aber auch akustische Muster- und Geruchserkennung. Alles Aufgaben, die die menschliche Wahrnehmung mehr oder weniger mühelos erledigt. Die traditionelle Automatisierungstechnik von Thermoprozessanlagen hat hierfür aber (noch) keine Sensoren.

Im Kontext dieses Beitrags (datengetriebene Zustandsüberwachung) geht es also um etwas anderes, es geht um ein- und mehrdimensionale Muster von technischen Ereignissen. Regelmäßigkeiten oder Wiederholungen treten nämlich auch als Ereignismuster in der Automatisierungstechnik auf, die analysiert und in Beziehung gesetzt werden können.

Viele mechanische Ausfälle kündigen sich durch sich wiederholende charakteristische Ereignismuster an, oft eine Abfolge oder Häufung von mehreren Ereignissen, z. B. Störungshäufigkeit und Bedienereingriffe. Der Informationsgehalt von Ereignissen ergibt sich aber auch häufig erst aus einem Ereignismuster. Beispielsweise zeigen sich Abnutzung und Verschleiß als Rattermarken auf der Oberfläche von Gleitflächen, die als Stromverlaufsmuster des Antriebs erfasst werden könnten.

Ereignismuster müssen nicht notwendigerweise in der Thermoprozessanlage selbst auftreten. Es ist gut möglich, dass sich korrespondierende Ereignismuster erst in nachfolgenden Prozessen, z. B. als erhöhte Streuungen in

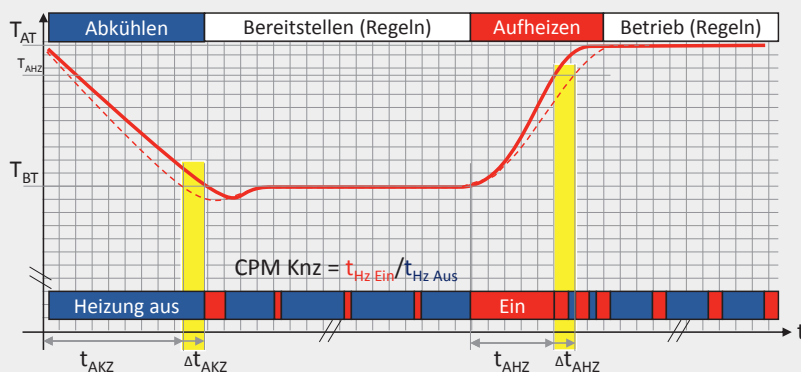


Bild 3: Prinzip des PDM und PDV zum Wärmeverlust-Monitoring eines Ofens

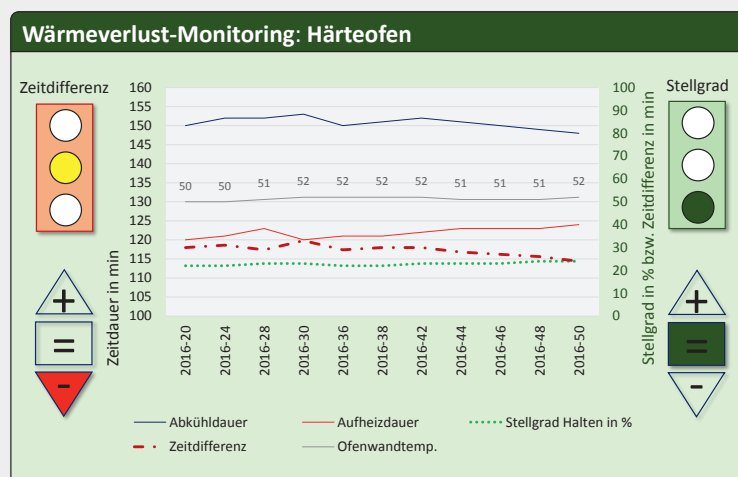


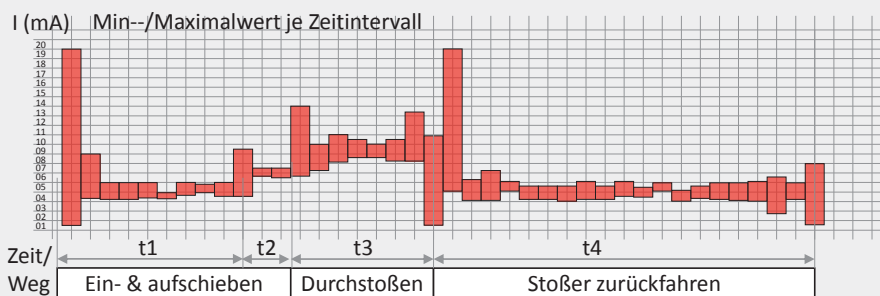
Bild 4: Wärmeverlust-Monitoring mit PDM und PDV

Qualitätsdaten bemerkbar machen. Nicht zuletzt aus diesem Grund ist die datengetriebene Zustandsüberwachung eine Methode der Industrie 4.0, weil sie mit Einbeziehung des Internet auch über die eigenen Grenzen hinausgeht.

### Beispiel einer Mustererkennung: Zustandsüberwachung einer Durchstoßeinrichtung

Soll beispielsweise eine Durchstoßeinrichtung (bestehend aus Antrieb, Stoßer, Gleitsteinen etc.) überwacht werden, dann kann der Stromverlauf, wie in **Bild 5** beispielhaft dargestellt, als komplexes, sich veränderndes digitalisiertes Muster sichtbar werden.

Welche Ursache dem Muster genau zugrunde liegt, ist aber erst bei einer Inspektion feststellbar, weil sowohl die Schrittausführungsdauer als auch die Stromaufnahme über den Weg noch durch weitere Faktoren, z. B. die Rostbeschaffenheit und das Bruttogewicht, beeinflusst werden. Eine solche Zustandsüberwachung bzw. Mustererkennung kann also nur auf einen potenziellen Fehler



**Bild 5:** Prinzipielles digitalisiertes Stromverlaufsmuster eines Durchstoßers

des Gesamtsystems hinweisen, aber noch keine konkrete Fehlerursache nennen.

Um es auf den Punkt zu bringen: Zustandsveränderungen ohne Mustererkennung können noch mit „Bordmitteln“ ausgewertet werden. Im Gegensatz dazu sind für die Mustererkennung fortgeschrittene Algorithmen erforderlich, die meist auf einer Cloud bereitgestellt werden. Dies wird im zweiten Teil dieses Beitrags noch weiter ausgeführt.

### Rückmeldungen der Instandhalter

Während die Betriebs- und Maschinendaten und alle Eingangsdaten in das Automatisierungssystem automatisch erfasst werden können, ist bei den Rückmeldungen die Mitwirkung des Bedien- oder Instandhaltungspersonals erforderlich. Eine Rückmeldung dokumentiert z. B. den Stand der Bearbeitung eines Instandhaltungsauftrags, die



**Bild 6:** Zustandsüberwachung durch einen Service-Techniker

Störungsgründe oder aber welche Bauteile ersetzt worden sind. Ohne eine Rückmeldung zu den durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen und Störungsgründen läuft eine vorausschauende Instandhaltung ins Leere. Wie sonst sollte eine Software, z. B. Predictive Analytics, diese Zusammenhänge herstellen oder gar die Ursache-Wirkungsbeziehungen selbst erlernen?

Eines darf bei der Fokussierung auf technische Methoden auch nie vergessen werden: Die Zustandsüberwachung kann vielleicht zunehmend maschinell erfolgen und automatisiert werden, aber erst der Abgleich mit dem Expertenwissen macht

aus nackten Zustandsdaten wertvolle Informationen. Der qualifizierte Servicetechniker (**Bild 6**) ist und bleibt unersetzlich.

Aber seine Rolle wird sich dramatisch weiter verändern. Erfahrung und Fachkompetenz bleiben zwar mindestens so wichtig wie bisher, in Zukunft werden sich aber menschliche und digitale Intelligenz noch viel enger miteinander verzahnen [8].

### Serviceberichte

Inspektionsergebnisse und die durchgeführten Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen müssen dokumentiert werden, weil sonst keine Lernzyklen möglich sind. Serviceberichte werden meist in Textform, häufig mit Fotos erstellt. Dann ist eine maschinenlesbare „Übersetzung“ erforderlich. Serviceberichte sind wahrscheinlich das Paradebeispiel der unstrukturierten Zustandsdokumentation.

Die Analyse von unstrukturierten Text- und Bildinformationen macht allerdings noch große Mühe, daher auch die starke Nachfrage nach mobilen Endgeräten (Tablets) mit strukturierten „elektronischen Checklisten“ und einer Online-Verbindung zur IT-Infrastruktur. Rückmeldungen können dann auch direkt in die ERP-Systeme, z. B. SAP Preventive Maintenance, erfolgen und automatisch zwischen den verschiedenen Systemen synchronisiert werden.

In der Text- und Bildanalyse liegt noch ein riesiges Potenzial, weil die Hardware zur Erfassung der Zustandsinformation, z. B. die Digitalkamera in Pads schon vorhanden ist. Semantische Technologien, insbesondere Bild- und Textanalysen, sind für die Einbindung der Inspektionsberichte in eine vorausschauende Instandhaltung unverzichtbar. Dies ist aber ein Thema für sich alleine.

### FAZIT UND AUSBLICK AUF TEIL 2

Gibt es also neue Erkenntnismöglichkeiten? Kann die datengetriebene Zustandsüberwachung die bisher dem Condition Monitoring nicht zugänglichen ausfallkritischen Bauteile miteinbeziehen?



Es kommt darauf an. Grundsätzlich gilt, dass die Abnutzungsmerkmale mindestens indirekt zugänglich sein müssen, z. B. über Laufzeitveränderungen und Stromverlaufsmuster von Antriebsmotoren, über den Stellgrad der Temperaturregelung oder über Ereignismuster. Daran ändern auch noch so große Datenberge nichts. Korreliert der analysierte Informationsgehalt nicht mit dem Problem (Abnutzung und Verschleiß), so kann frühzeitig keine Veränderung des Zustands erkannt werden.

Die datengetriebene Zustandsüberwachung hat die Einschränkung, dass ein entstehendes Verschleißproblem oft nur eingegrenzt werden kann. Die tatsächliche Problemsache muss dann bei einer nachfolgenden Inspektion bestätigt werden, wie dies auch in den Beispielen ausgeführt wurde. Die datengetriebene Zustandserfassung kann also CMS und Inspektionen nicht ersetzen, sinnvoll ergänzen aber schon.

Die größten Vorteile der datengetriebenen Zustandsüberwachung sind, dass vorhandene Daten verwendet und meist keine zusätzlichen Sensoren benötigt werden. Dann braucht man auch für die Einbeziehung von Altanlagen fast keine zusätzliche Verkabelung und spart Kosten. Die datengetriebene Zustandsüberwachung holt vorhandene Informationen in Echtzeit aus dem Automatisierungssystem heraus, ohne in die Funktion der Anlage einzugreifen. Sie verwendet die vorhandene Infrastruktur des Automatisierungssystems, von der SPS über das Bediensystem bis zu mobilen Tablets.

Think big, start small: Auf dem Weg in eine vorausschauende Instandhaltung muss es auch nicht immer gleich der ganz große Wurf sein. Kleine Schritte ebnen den Weg in die Zukunft. Wir stecken alle noch mitten in einem Lernprozess. Eine umfassende Datenanalyse rechtzeitig vor einer Jahreswartung mithilfe eines spezialisierten Analysten ist ein guter Einstieg. Dazu braucht es erst einmal keine Cloud, kein Predictive Analytics und keine umfangreichen Investitionen.

Wie die datengetriebene Zustandsüberwachung mit der vorausschauenden Instandhaltung zusammenwirkt, wird im zweiten Teil dieses Beitrags beschrieben. Dann geht es um Themen wie Big Data, Data Mining, Einflussfaktoren, Lebensdauerprognosen, Prognosegenauigkeit und Risikoprofile sowie die Visualisierung der Informationen in einem digitalen Zwilling.

## LITERATUR

- [1] Moubray, J.: RCM, Die hohe Schule der Zuverlässigkeit von Produkten und Systemen. Landsberg: mi, Verlag Moderne Industrie, 1996
- [2] Steck-Winter, H.: Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprosessanlagen. gwi – gaswärme international 60 (2011), Nr. 3, S. 141-152
- [3] Steck-Winter, H.: Integratives Instandhaltungsmanagement von Thermoprosessanlagen. gwi – gaswärme international 57 (2008). Nr. 7-8, S. 519-526
- [4] Rode, M.: Control performance monitoring. BWK 56 (2004) Nr. 9, S. 51
- [5] Mayer, D.: Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2015
- [6] Schenkendorf, R.; Böhm, T.: Aspekte einer datengetriebenen zustandsabhängigen Instandhaltung, Teil 1 bis 3. EI-Eisenbahningenieur, 2015
- [7] Weide, K.: Data-Mining – Aufspüren von Mustern mit Hilfe von Entscheidungsbäumen. Humboldt-Universität zu Berlin, 2012
- [8] Güntner, G.; Benisch, M.; Dankl, A.; Isopp, J. (Hrsg.): Roadmap der Instandhaltung 4.0. Salzburg, 2015

## AUTOREN



Dr. **Hartmut Steck-Winter**, MBA  
Vormals Aichelin Service GmbH  
Ludwigsburg  
Tel.: 0176 / 9787-3726  
steck-winter@gmx.de



Dipl.-Ing. **Carsten Stöltzing**, MBA  
Aichelin Service GmbH  
Ludwigsburg  
Tel.: 07141 / 6437-106  
carsten.stoelting@aichelin.com



Ing. **Günther Unger**  
Aichelin GmbH  
Mödling, Österreich  
Tel. +43 (0)2236 / 23646-275  
guenther.unger@aichelin.com