Dem Verschleiß auf den Grund gehen – mit Sensoren

Früher hat ein erfahrener Mitarbeiter mit seinen Sinnesorganen Veränderungen im Verhalten von Maschinen wahrgenommen, die auf eine Störung hinwiesen. Veränderungen in der Art des Geräusches, des Vibrationsverhaltens, der Oberflächentemperatur, der Steifigkeit von Strukturen etc. waren Hinweise darauf.

Heute übernehmen Sensoren diese Aufgabe. Sie werden bei Lebensdauer- und Belastungsprüfmethoden verwendet, um Schwachstellen von Prüflingen zu erkennen.

Betriebsfestigkeitsprüfungen (Durability):

Bei der Bestimmung der Lebensdauer eines Produkts spielt die Betriebsfestigkeit eine wesentliche Rolle. Diese Eigenschaft beschreibt, wie ein Prüfling Belastungen in einem definierten Zeitraum schadensfrei überstehen kann. Dazu werden oft mit Hilfe der „Wöhlerkurve" die Last- bzw. Spannungsamplituden gegen die Anzahl der Zyklen jeweils logarithmisch dargestellt. Die Wöhlerkurve ist in drei Bereiche eingeteilt:

Kurzeitfestigkeit oder statische Festigkeit (<10.000 Zyklen Schadensfreiheit), Zeitfestigkeit (>10.000 bis <1 Million Zyklen Schadensfreiheit) und Dauerfestigkeit (>1 Million Zyklen Schadensfreiheit)

Um Betriebsfestigkeitsprüfungen einigermaßen genau zu bestimmen braucht es viel Zeit (bei Fahrzeugen manchmal 1 Million km Fahrstrecke und drei Jahre Dauerversuche). Um diese Prüfungen in realistischen Zeiträumen durchführen zu können, ist eine Verkürzung notwendig. Dies kann beispielsweise durch Änderungen an den Parametern der Experimente erreicht werden:

1) Höhere Belastungsamplituden
2) Höhere Geschwindigkeiten
3) Nur wesentliche Ereignisse
4) Vereinfachung (beispielsweise durch Verwendung von Sinus- statt realen Schwingungen)

Environmental Stress Screening (ESS)

ESS beschreibt eine solche Belastungsprüfung und -auslese in einer beschleunigten Lebenszeit. Hier werden Prüflinge in einer verhältnismäßig kurzen Zeit (Tage bis Monate) Belastungen unterworfen, die normalerweise während der gesamten Lebensdauer des Prüflings vorkommen. Ziel ist es, die Ausfallhäufigkeit zu minimieren. Hierbei wird versucht den in der Skizze dargestellten „Badewannenverlauf" so „tief" wie möglich zu halten.

ESS wird in die zwei Bereiche HASS und HALT unterteilt, in der diese Ausfälle eintreten können:

- HASS, eine Auslese-Püfung (ohne Beschädigung der Produkte), die

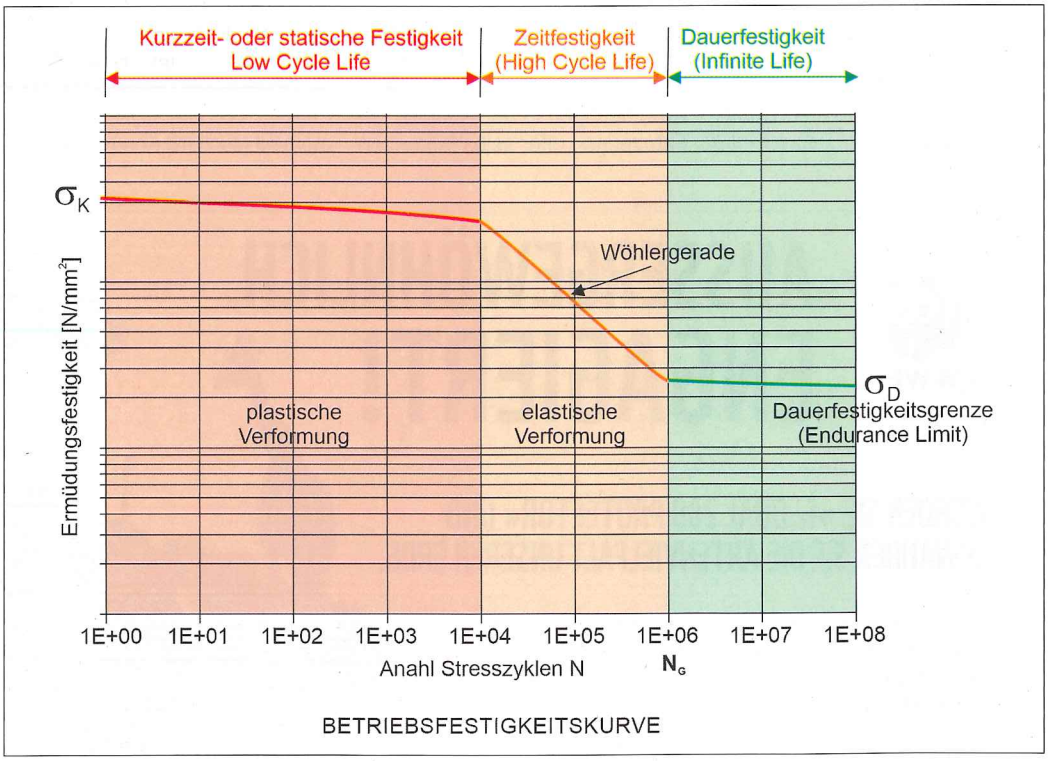

Bild 1: Mit Hilfe der „Wöhlerkurve" werden die Last- bzw. Spannungsamplituden gegen die Anzahl der Zyklen jeweils logarithmisch dargestellt.

Autor:
Dipl. Phys. H. A. Holtkamp,
Geschäftsführer

disynet GmbH
sensoren@disynet.de
www.sensoren.de

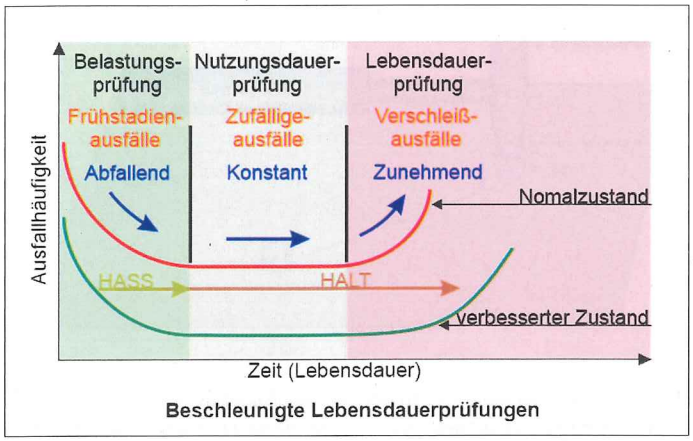

Bild 2: Die beschleunigte Lebensdauerprüfung deckt Schwachstellen auf

in der Produktionsphase eingesetzt wird, um Fertigungsfehler zu erkennen (also am Anfang des Lebenszylkus). Prüfungen während der normalen Nutzungsdauer des Produktes mit einer relativ konstanten und zufälligen Ausfallrate.

- HALT, eine Konstruktions-Prüfung, die in der Entwicklungsphase eingesetzt wird, um Designfehler zu erkennen. Hier werden Prüflinge solange getestet, bis sie eine Beschädigung aufweisen (also eher am Ende des Lebenszyklusses).

Higly Accelerated Life Testing (HALT)

Hier wird versucht, Designfehler zu erkennen. Diese sind beispielsweise ungeeignetes, zu dünnes oder zu dickes Material, falsche Bauformen, schlechte Aerodynamik, schlechte Federung, zu grobe Toleranzen etc. Solche Fehler können dazu führen, dass das Produkt im Betrieb zu stark vibriert, an Schwachstellen leicht bricht, bei hohen Temperaturen geschwächt wird, Flüssigkeitsleitungen im Produkt undicht werden, etc.

Um diese Mängel zu erkennen, wird das Produkt Belastungen durch Temperatur und Vibration ausgesetzt, die stufenweise so lange erhöht werden, bis es ausfällt. Die so getesteten Produkte können nicht mehr verwendet werden.

HALT ist also auf den ersten Blick sehr kostenintensiv. Aber mittels HALT werden Schwachstellen durch Designfehler in kürzester Zeit erzwungen, die sonst erst mehrere Jahre nach der Markteinführung - während dem Betrieb beim Kunden - erkennbar werden würden. Da Produkte erst nach Beseitigung dieser Fehler im Design auf dem Markt eingeführt werden, wird die Betriebslebensdauer deutlich erhöht, sehr hohe Haftungskosten vermieden, die beispielsweise auf Grund von Produktausfall oder von Rückholaktionen entstehen, und damit schließlich die Produktzufriedenheit der Kunden deutlich verbessert. Deshalb stellt HALT ein sehr wirtschaftliches Verfahren dar.

Bild 4: Maßgeschneiderter Drehmomentsensor mit Telemetrie zur Getriebeüberprüfung

Bild 3: In der ESS-Kammer werden die Produkte einer Alterung unterzogen

Highly Accelerated Stress Screen (HASS)

HASS ist eine stark beschleunigte Belastungsauslese von Produkten während der Produktion. HASS wird in der Produktionsendkontrolle eingesetzt, um mangelhafte Produkte auszusortieren und Fertigungsfehler - im Gegensatz zu Designfehlern - zu finden.

Fertigungsfehler sind beispielsweise kalte Lötstellen, schlechte Schweißnähte und andere Verbindungen, lose Schrauben, Luftblasen bei Verklebungsprozessen, usw... Da die Produkte nicht beschädigt werden dürfen, sind die Belastungen bei HASS deutlich niediger als bei HALT. Mit HASS wird versucht, die Frühphase des Produktes im Betrieb in sehr kurzer Zeit durchlaufen zu lassen. Diese künstliche Alterung provoziert herstellungsbedingte Schwachstellen bei fehlerhaften Produkten, die sonst nur nach dem Einsatz im Betrieb festzustellen wären. Fehlerhafte Produkte können so in der Produktionsendkontrolle herausgefiltert werden. Gute Produkte werden durch HASS (im Gegensatz zu HALT-Prüfungen) nicht gefährdet.

Non-Destructive Testing (NDT)

Diese Art von zerstörungsfreier Werkstoffprüfung (ZfP), bezeichnet man generell als NDT. Hier wird die Qualität des Prüflings mit unterschiedlichen Verfahren untersucht, ohne ihn zu beschädigen. Die verwendeten Verfahren kön-

Bild 5: Durch Condition Monitoring können Abweichungen frühzeitig erkannt werden. Außerdem kann der optimale Zeitpunkt einer Wartung ermittelt werden.

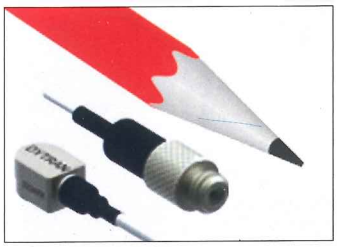

Bild 6: Die Auswahl an kleinen Sensoren ist vielfältig

nen je nach Art des Verschleißes sehr unterschiedlich sein. Dazu gehören - außer einer rein visuellen Prüfung - Messungen der Dehnung u. a. mit Dehnungsmessstreifen, Wirbelstrom-, magnetoresistiven- oder Lasersensoren, Feuchtemessungen, Dichtigkeitsprüfungen, Strukturmessungen durch Modalanalyse, Ultraschall- oder Körperschallsensoren, Oberflächenprüfungen durch Laserscanner, Mikroskope oder optische Farbeindringprüfungen und vieles mehr.

Condition Monitoring (Zustandsüberwachung)

Im Gegensatz zum ESS (HALT und HASS), die die Lebensdauer durch höhere Belastungen künstlich verkürzt, wird die Zustandsüberwachung während der Lebenszeit eines gefertigten Produkts durchgeführt.

Während des Betriebs eines Produktes können - außer durch regelmäßige Wartungen am Objekt - auch durch eine dauerhafte Messung mit Sensoren am Prüfling, aufkommende Fehler schon früh erkannt werden, um dann entsprechende Maßnahmen vorzeitig ergreifen zu können, bevor ein größerer Schaden tatsächlich auftritt. Zurzeit erfolgt diese Erkennung meist noch durch geschultes Personal, das die Signale der Sensoren richtig interpretieren kann. In Zukunft wird diese Erkennung durch „intelligente Sensoren" in vorhandenen Bus-Systemen wie CAN kontinuierlich durchgeführt. Geplant ist auch, dass die zu überwachenden Parameter durch eine aus bekannten Fehlern lernfähige künstliche Intelligenz in einem Sensorverbund z. B. mit neuronalen Netzwerken definiert werden, um diese Maßnahmen sehr viel zuverlässiger und fehlerfreier durchzuführen. Diese Zustandsüberwachung ermöglicht, durch geeignete Methoden auch eine Vorausschauende Wartung oder auch Predictive Maintenance. Hierdurch ist man nicht mehr an feste Wartungs-Intervalle gebunden . Dies birgt ein erhebliches Einsparpotential hinsichtlich der Personal und Ersatzteil-Kosten.

Grundlage für alle diese Maßnahmen sind geeignete Sensoren.

Geeignete Sensoren für die Prüfmethode

Wie zu erkennen ist, gibt es nicht nur eine Vielzahl von Methoden zur Optimierung eines Produkts, sondern eine ganze Fülle an Sensoren und Herstellern, die sich auf das jeweilige Sensorsystem bzw. eine bestimmte Prüfmethode spezialisiert haben. Was dem Anwender leider häufig fehlt, ist ein Überblick über die verschiedenen Methoden und Sensoren.

Unabhängigkeit vom Sensorprinzip

Hier ist es wichtig, dass der Kunde einen professionellen Partner an seiner Seite hat, der in seinem Portfolio Sensoren für die unterschiedlichsten physikalischen Größen hat. Eine technische Ausrichtung und Systemverständnis ist hierbei sehr hilfreich, denn sie eröffnen die Möglichkeit, Kunden die Unterschiede, Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden, Sensoren und Sensorprinzipien zu erläutern und somit die optimale Lösung für die Anwendung auszusuchen.

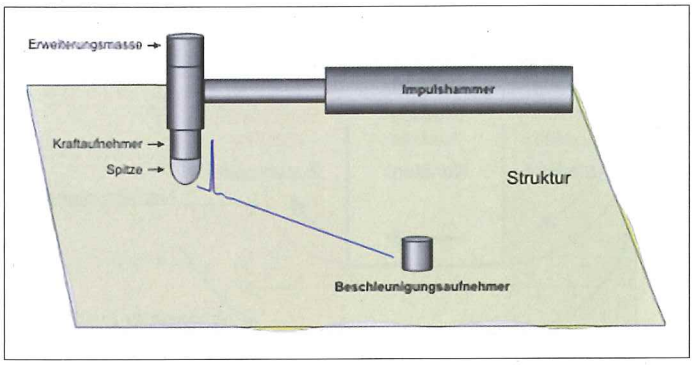

Bild 7: Bei der Modalanalyse erzeugt der Impulshammer ein Impulsspektrum das mit dem Spektrum des Antwortsignals verglichen wird

Verschiedene Sensoren für die gleiche Messgröße

Sensoren mit unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien können dieselbe Messgröße messen. Je nach Anwendung kann dann der Sensor, der auf dem einen oder anderen Messprinzip beruht, seine jeweilige Stärke ausspielen. Beispielsweise werden für Schock-Tests meistens piezoresistive Beschleunigungssensoren verwendet, für Schwingungsbelastungen piezoelektrische und für langsame Bewegungen kapazitive Beschleunigungssensoren.

Verschiedene Sensoren für die gleiche Verschleißprüfung

Für die Erkennung von Motorverschleiß könnte man eine Temperaturmessung verwenden, denn ein Temperaturanstieg ist meistens schon ein Zeichen von Verschleiß. Allerdings ist der Verschleiß dann meistens schon so weit fortgeschritten, dass es für einen Eingriff zu spät sein könnte. Besser wäre es, schon an einer Veränderung am Ton oder Geräuschpegel des Motors einen Verschleiß zu erkennen. Hier kann also eine Vibrationsmessung eingestetzt werden. Wo es früher hierzu einen geübten Techniker gebraucht hat, übernehmen dies jetzt Beschleunigungssensoren oder Mikrofone.

Noch früher ist dies möglich, wenn man den tatsächlichen Metall-Abrieb im Getriebe frühzeitig erkennt und den Nutzer alarmiert, denn oft tritt dieser auf, bevor es zu einer wahrnehmbaren bzw. messbaren Änderung im gemessenen Frequenzspektrum des Motors kommt.

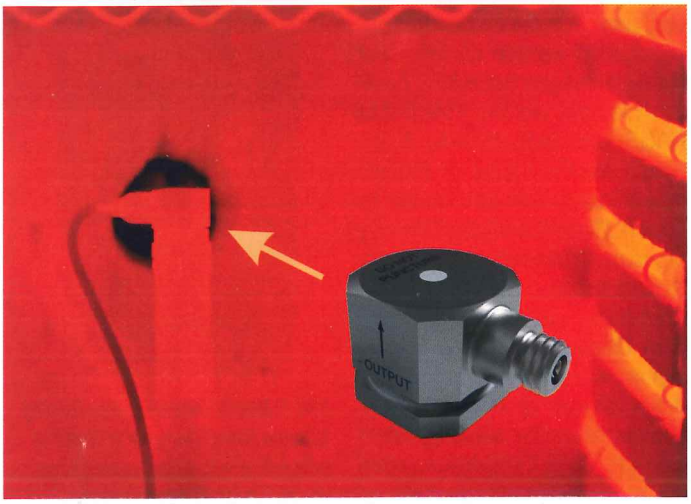

Bild 8: Sensor für sehr hohe Temperaturen bei der Prüfung im Ofen

Bild 9: „Made to measure" bedeutet die Anpassung der vorhandenen Sensoren an ihre spezifische Anwendung

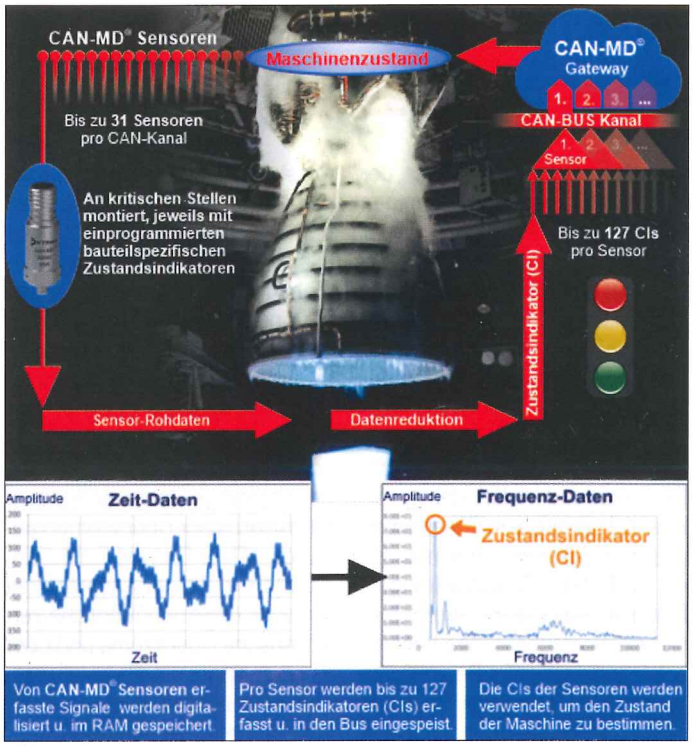

Bild 10: Vernetzte Sensoren, die die Daten selbständig analysieren, sind die Zukunft

Abrieb an Teilen, der während einer Wartung durch das bloße Auge nicht erkennbar ist, kann beispielsweise durch Laserscanner gemessen werden, um Veränderungen an der Oberfläche zu erfassen und als 3D-Modell zu visualisieren.

Auch die Risserkennung nicht sichtbarer Risse können durch Modalanalyse oder Ultraschall-Messungen erkannt werden. Bei der Modalanalyse werden die Spektren des Erzeuger-Impulses (Kraftsensor im Hammer) mit dem Spektrum des Antwortsignals verglichen. Einen Riss kann man an der Änderung des Frequenzspektrums erkennen.

Modalanalyse

Die Modalanalyse wird hauptsächlich verwendet, um die Schwingungsmuster (Moden) zu erkennen. Dies kann auch bei der HALT-Methodik eine wesentliche Rolle spielen. Die Prüflinge werden dabei entweder durch einen Impulshammer oder einen Shaker angeregt und mit Sensoren an verschiedenen Stellen gemessen, um zu schauen, wie stark der jeweilige Bereich schwingt bzw. ausgelenkt wird.

Die Auslenkung kann aber wiederum auch durch Laser-Vibrometer, die die Schwingungsamplituden direkt messen, sehr genau bestimmt werden.

Messungen an heißen Teilen

Für die Prüfung an heißen Teilen (wie beim Auspuff oder bei Turbinen) ist es zudem notwendig Sensoren einzusetzen, die hohe Temperaturen bis über 600 °C aushalten, ohne selbst beschädigt zu werden.

Maßgeschneiderte Sensoren

Oft ist es nicht möglich Standardsensoren in vorhandenen Umgebungen zu montieren, ohne kostspielige Änderungen am System vorzunehmen. Hier ist man auf flexible Partner angewiesen, die – auch für geringe Stückzahlen – vorhandene Sensoren an die Anwendungen anpassen, nach dem Motto „Made To Measure".

Intelligente Sensoren

Die Zukunft aber liegt in intelligenten Sensoren und lernfähigen Erkennungs- und Wartungssystemen. Hier werden Sensoren vernetzt und senden nicht nur ihre Signale über ein BUS-System, wie beispielsweise CAN, an ein Auslese- und Analysegerät, sondern analysieren die Daten selbstständig mit integrierten Mikroprozessoren, wie dem erweiterten CAN-BUS-System CAN-MD; wobei MD für Maschinen Diagnose steht (maschine diagnostics).

Bild 11: Mit CAN-MD- Inlineadaptern können bereits vorhandene Analogsensoren mit „Intelligenz" aufgerüstet werden

Durch CAN-MD-Inlineadapter können bereits auf dem Markt befindliche Analogsensoren mit dieser Intelligenz aufgerüstet werden, um mit CAN-MD im Zustandsüberwachungs-Netzwerk eingebunden zu werden.

Zustandsindikatoren, CI (Condition Indicators)

In jedem CAN-MD-kompatiblen Sensor können bis zu 126 Zustandsindikatoren programmiert werden. Mit bis zu 32 Sensoren pro CAN-BUS-Eingang eines kompatiblen Datenerfassungsgeräts kann dauerhaft sehr differenziert überwacht und damit auch schnell reagiert werden. Auch Rohdaten können über das BUS-System übertragen werden. Zudem können Sensoren im CAN-MD-System-BUS auch miteinander kommunizieren.

Internet Of Things (IoT)

Über das Internet können diese Maschinenzustandsdaten der Prüflinge (of Things) über ein CAN-MD-Gateway von der „Cloud" für eine Fernsteuerung und -verwaltung abgerufen werden.

Die Zukunft: künstliche Intelligenz

Allerdings muss auch hier eine technisch versierte Person die optimalen Parameter für die Zustandsindikatoren kennen und eingeben. In Zukunft wird ein KI-System in einem beschleunigten Lebenszyklus des Objektes (HALT) die Parameter durch Lernen von Fehlern selber erkennen und sich selbst ständig optimieren.

Nachhaltigkeit

Wie man sehen kann, sind die Möglichkeiten zur Verschleißverminderung sehr vielfältig. Den richtigen Sensor und das richtige Verfahren auszuwählen kann die Lebensdauer von Produkten erheblich verlängern und somit nicht nur den Benutzern eine Menge Ärger und dem Hersteller eine Menge Kosten ersparen, sondern auch einen wertvollen Beitrag zur Nachhaltigkeit und zum Schutz unserer Umwelt leisten. ◄

Bild 12: Die Möglichkeiten der Verschleißminderung leisten einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit