

# SELBSTDIAGNOSE IM LAUFENDEN BETRIEB

Flugzeugstruktur mit Sensoren:  
Sie signalisieren, wenn ein Schaden droht

DLR-Querschnittsprojekt zum Condition Monitoring:  
Algorithmen erkennen Schäden, bevor sie entstehen

Von Dr. Daniel Krause

**A**bgeschlagenheit, Ruhebedürfnis, Konzentrationsschwierigkeiten – schon bevor eine Krankheit ausbricht, signalisiert uns der Körper, dass etwas nicht stimmt. Unser Nervensystem kann Veränderungen im Körper frühzeitig erkennen. Was wäre, wenn Maschinen und Anlagen mit solchen Wahrnehmungssystemen ausgestattet wären?

Die Zustandsüberwachung von Anlagen – genannt Condition Monitoring – ist so alt wie die Industrialisierung. Ende des 19. Jahrhunderts begann der neu gegründete TÜV, Dampfkessel regelmäßig zu überprüfen. Schwere Unfälle durch explodierende Kessel gehörten damit weitestgehend der Vergangenheit an. Seither sind regelmäßige Inspektionen bei sicherheitsrelevanten Strukturen weltweit üblich. Diese Kontrollen sind teuer und aufwändig. Außerdem können sie umfangreiche Reparaturen nicht immer verhindern. Wenn Anlagen rechtzeitig aus dem Betrieb genommen werden, vermindert sich ihr Reparaturaufwand. Genau hier setzt Condition Monitoring im engeren Sinne an: Sensoren überwachen die Anlagen kontinuierlich und erkennen Veränderungen unabhängig von Inspektionen. Solche Systeme können Fehler vorhersagen, erkennen und diagnostizieren. Inspektionen fallen dadurch idealerweise ganz weg. Der Mensch muss Wartungsarbeiten nur dann durchführen, wenn das System Fehler erkannt oder prognostiziert hat, nicht mehr turnusmäßig. Und die Anlagen werden im Betrieb wirtschaftlicher.

## Allgemeingültige Systeme

„Wer ein Condition-Monitoring-System entwickeln und betreiben möchte, muss einige Hürden überwinden. Das sind die Komplexität des Systems, der Investitionsbedarf und das durch zusätzliche Sensoren mitunter etwas höhere Gewicht der Anlage“, sagt Prof. Dr. Martin Wiedemann, Direktor des DLR-Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik. „Wir können an zwei Stellschrauben drehen, um das System entscheidend zu verbessern: an den Daten, auf denen es basiert, und an den Algorithmen, die die Daten bewerten.“

Wiedemann ist der Koordinator des DLR-Querschnittsprojekts Condition Monitoring of Safety Relevant Structures. Darin arbeitet ein Team von über 30 Forscherinnen und Forschern aus 15 DLR-Instituten und -Einrichtungen an neuen Diagnoseverfahren für den sicheren Betrieb von komplexen Anlagen. Angesichts zunehmend digitalisierter und vernetzter Produktionsprozesse sind Daten ihre wichtigste Arbeitsgrundlage.

## Daten – der Rohstoff des 21. Jahrhunderts

Inzwischen trägt ein Großteil der Menschen in seinen Smartphones mehr Sensoren mit sich herum, als sich Techniker vor 20 Jahren haben träumen lassen. Studien der Politecnico di Torino in Italien zeigten bereits 2012, dass Smartphones Schlaglöcher in Straßen detektieren oder Informationen zur Luftqualität liefern können. Die Verfügbarkeit und Bandbreite an Sensoren in jeder Preisklasse sind so hoch wie nie zuvor. Forscherinnen und Forscher des DLR-Instituts für Aeroelastik, die bisher besonders für zulassungsrelevante Schwingungstests auf hochpreisige und kalibrierte Spezialmesstechnik zurückgreifen mussten, stellten Ähnliches fest: „Unsere Vision ist ein Messsystem, das durchgängig aus handelsüblicher Industriemassenware besteht und dabei dennoch brauchbare Ergebnisse liefert“, erklärt Dr. Yves Govers, stellvertretender Abteilungsleiter für Strukturdynamik und Systemidentifikation. Erste Tests mit Standard-Industriesensoren zeigen vielversprechende Ergebnisse. Der Trend ist klar, aber der Weg noch weit: „Erst wenn die

## DAS DLR-QUERSCHNITTSPROJEKT CONDITION MONITORING OF SAFETY RELEVANT STRUCTURES:

**Laufzeit:** 4 Jahre

**Budget gesamt:** 15,6 Millionen Euro

**Beteiligte DLR-Institute und -Einrichtungen:**

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (Koord.)

Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

Institut für Aeroelastik

Institut für Flugsystemtechnik

Institut für Instandhaltung und Modifikation

Institut für Optische Sensorsysteme

Institut für Raumfahrtssysteme

Institut für Solarforschung

Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik

Institut für Technische Physik

Institut für Verkehrssystemtechnik

Institut für Werkstofforschung

Flugexperimente

Raumflugbetrieb und Astronautentraining

Simulations- und Softwaretechnik

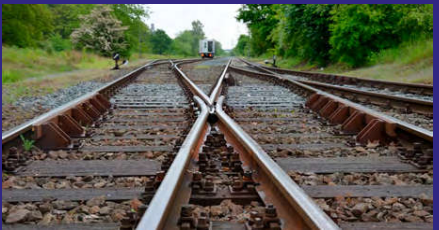
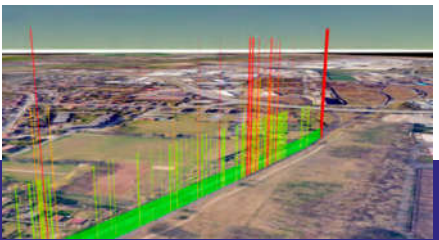
Messtechnik preiswert genug ist, werden die Hersteller sie auch in ihre Systeme einbauen“, so Govers. Ist die Zuverlässigkeit des Systems nachgewiesen, können mit verhältnismäßig geringen Investitionsaufwänden völlig neue Geschäftsfelder erschlossen werden. In vielen Anlagen sind bereits Sensoren integriert. Deren Daten fanden allerdings bislang wenig Beachtung.

## Algorithmen, die Unregelmäßigkeiten erkennen

Hoffnung geben verbesserte Algorithmen zur Datenauswertung. Sie sortieren die Informationen und identifizieren Unregelmäßigkeiten. Das gleicht der Suche nach der Nadel im Heuhaufen. Denn: Einerseits muss die Datengrundlage möglichst groß sein, um statistisch relevante Ergebnisse zu liefern, andererseits müssen die Algorithmen der Komplexität gewachsen sein. Angenommen, auf einem Satelliten misst jeweils ein Sensor Strom und Temperatur: „Ein Condition-Monitoring-System muss anschlagen, wenn entweder eine der beiden Größen oder die Verknüpfung beider Datenverläufe abweicht, also beispielsweise die Temperatur nach Einschalten des Systems sinkt, denn normalerweise steigt diese mit dem Stromfluss“, erklärt Leonard Schlag, Forscher im DLR-Raumflugbetrieb und beteiligt am Projekt ATHMoS, einem System zur automatisierten Überwachung von Satellitendaten. Gelingt dies zuverlässig, erschließen sich mit entsprechenden Überwachungssystemen neue Geschäftsmodelle. Ein Beispiel ist das „Power-by-the-Hour“-Prinzip von Rolls-Royce. Der Triebwerks-



Die Bilder zeigen die Fernwärmeleitung des Heizkraftwerks BTB in Berlin-Adlershof sowie den Wärmespeicher (hinten rechts). Mit Hilfe des Integrated Positioning Systems IPS (Beitrag im DLR-Magazin 161) werden mittels optisch abbildender Sensoren digitale Datenprodukte für die energetische Untersuchung von Gebäuden und Industrieanlagen erzeugt. Mit dem Thermalbild können die Wissenschaftler den Zustand der Anlage bewerten. Tritt Wärme an einer undichten Stelle aus? Gibt es Schwachstellen in der thermischen Isolierung? IPS versteht das Thermalbild zusätzlich mit Ortsinformationen. So wissen die Forscher genau, wo sich die Schadstelle befindet.



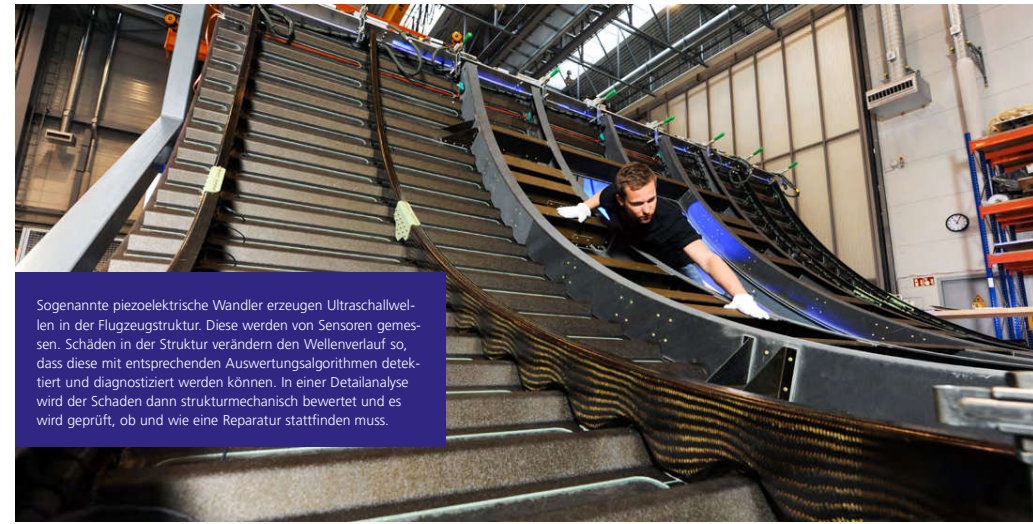
Condition-Monitoring-Systeme können auch zur Überwachung der Bahninfrastruktur eingesetzt werden, wie hier bei einer Rangierlok im Braunschweiger Hafen. Sensoren in den Achslagern des Fahrzeugs messen kontinuierlich Vibrationen. Diese Informationen lassen auf den Zustand der Strecke schließen.

hersteller „verleiht“ Triebwerke, inklusive Überwachung, Wartung und Reparatur, an Fluglinien. Bezahlt wird, wenn das Triebwerk tatsächlich im Einsatz ist. Ein solches Geschäftsmodell steht und fällt mit der Zuverlässigkeit des Zustandsüberwachungssystems. Falsche positive Meldungen führen zu zusätzlichen Wartungsterminen und hohen Kosten, beispielsweise beim Schadensersatz nach Ausfällen bei Airlines oder für die Wartung. Unterbleiben Meldungen bei abnormalem Verhalten, so ist dies eine unzulässige Gefährdung. Die Algorithmen müssen daher einerseits ausreichend zuverlässig sein, ohne andererseits Fehlalarme auszulösen.

**Forschungsbereiche greifen ineinander**

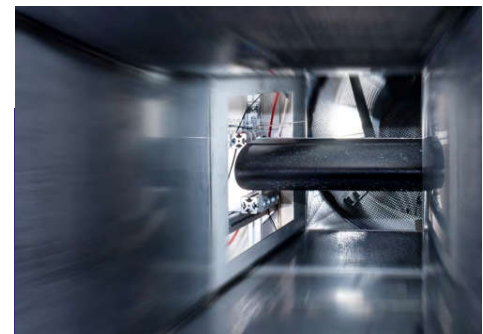
Die Komplexität der Auswertung steigt schon mit wenigen verknüpften Messgrößen massiv. Im DLR-Querschnittsprojekt tauschen Fachleute unterschiedlicher Institute in der Arbeitsgruppe „Anomaliedetektion“ ihre Erfahrungen mit solchen Prozessen aus und entwickeln sie weiter. Perspektivisch können beispielsweise Auswertungsmethoden aus der Raumfahrt auch in Überwachungssystemen für Verkehrsinfrastrukturen angewendet werden. „Da Condition-Monitoring-Systeme sehr vielschichtig und häufig auf eine Fachrichtung zugeschnitten sind, haben wir uns das Ziel gesetzt, unsere Ergebnisse über alle Forschungsbereiche hinweg miteinander zu verzahnen und universelle Verfahren und Technologien zu entwickeln“, fasst Wiedemann das Vorhaben zusammen.

Während einige Partner an nahezu vollständigen Szenarien forschen, stellen andere Bausteine bereit: Fachleute aus den DLR-Instituten für Solarforschung, Optische Sensorsysteme und Technische Physik erforschen zusammen, wie mit 3D-Vermessungsdaten frühzeitig Schäden in Gebäuden erkannt werden können; ein Team des traditionell Luftfahrzeuggewandten Instituts für Aeroelastik untersucht mit dem Institut für Verkehrssystemtechnik, inwiefern sich Schwingungsanalyse-Methoden aus der Luftfahrt zur Zustandsüberwachung bei Schienen-



Sogenannte piezoelektrische Wandler erzeugen Ultraschallwellen in der Flugzeugstruktur. Diese werden von Sensoren gemessen. Schäden in der Struktur verändern den Wellenverlauf so, dass diese mit entsprechenden Auswertungsalgorithmen detektiert und diagnostiziert werden können. In einer Detailanalyse wird der Schaden dann strukturellmechanisch bewertet und es wird geprüft, ob und wie eine Reparatur stattfinden muss.

fahrzeugen eignen. In diversen Flugversuchen – sowohl mit Forschungsraketen als auch mit Luftfahrzeugen – werden Daten gesammelt, die ebenso als Grundlage für die Entwicklung neuer Technologien dienen wie zu deren Qualifikation und Zertifizierung. Beispielsweise wird ein System erprobt, das gefährliche Vereisungszustände am Flugzeug erkennt. Der Pilot wird rechtzeitig gewarnt und kann Gegenmaßnahmen einleiten. Darüber hinaus arbeitet das DLR-Team daran, Schäden in Faserverbundstrukturen von Flugzeugen zu überwachen und zu bewerten oder Anomalien in Satellitendaten zu detektieren. Neben den Prozessen beschäftigen sich die Forscherinnen und Forscher auch mit Einzeltechnologien, die perspektivisch Teil eines Condition-Monitoring-Systems sein können. Dazu gehören Sensoren, die Energie aus ihrer Umgebung ziehen und deshalb keine weitere Energieversorgung benötigen, oder auch Sensoren zur Detektion von Mikrometeoriteneinschlägen in Raumfahrzeugen.



Eine neue Technologie erkennt und bekämpft Vereisungen an Flugzeugflügeln, bevor sie zum Problem werden. Nachdem der Test im Labor-Eiswindkanal erfolgreich war, erproben die Wissenschaftler die Technik nun unter Realbedingungen im Flugversuch.

Technik, auf die wir uns verlassen können, sagt Funktionsausfälle verlässlich voraus – eine Zukunftsaussicht, die für eine Fülle von Industrie- und Lebensbereichen interessant ist. Im DLR arbeiten kluge Köpfe aus den verschiedensten Fachbereichen daran.

**Dr. Daniel Krause** ist Luft- und Raumfahrtingenieur. Er arbeitet als Wissenschaftler am DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik und leitet das Querschnittsprojekt Condition Monitoring of Safety Relevant Structures.

Das System ATHMoS unterstützt die Überwachung von Satelliten, indem es für alle Messgrößen und Sensoren am Satelliten eine Vielzahl statistischer Parameter ermittelt und permanent mit dem vorher erlernten Verhalten des Satelliten vergleicht. Neben einfachen Grenzwertüberschreitungen werden Kurz- und Langzeittrends ausgewertet und im Anschluss visuell so aufbereitet, dass der Zustand des Satelliten auf den ersten Blick erkennbar ist. Somit bleibt dem Ingenieur an der Betriebskonsole auch bei Tausenden zu überwachender Messgrößen keine unerwartete Änderung verborgen.

