

Norbert Meyendorf

## **Neue Konzepte für Bauteil- und Materialüberwachung in der Verkehrstechnik – speziell in Bahn und Flugzeug**

Die Sicherheit technischer Anlagen – insbesondere von Anlagen der Verkehrstechnik – und von Fahrzeugen wird gegenwärtig durch

1. Sicherheitszugaben bei der Bauteildimensionierung
2. regelmäßige Inspektionen
3. rechtzeitigen Austausch von sicherheitsrelevanten Baugruppen und Verschleißteilen

gewährleistet. Der Entwicklungsstand von Sensorik und Mikroelektronik erlaubt es jedoch heute, Werkstoffe und Bauteile während ihrer Lebenszeit kontinuierlich zu überwachen. Kurzfristig werden diese Technologien zur Optimierung des Wartungsaufwands und des Materialeinsatzes genutzt. Längerfristig kann dies den Beginn einer neuen technologischen Ära darstellen, nämlich der Ära von Maschinen, die sich selbst überwachen, diagnostizieren und gegebenenfalls reparieren können. Den Schlüssel dazu bilden Bauteile mit integrierten sensorischen Eigenschaften und energieautarke selbstorganisierende Sensornetzwerke. Es ist zu erwarten, dass der Fortschritt dieser Technik nicht nur von den technologischen Möglichkeiten abhängt, sondern auch von der Akzeptanz in der Gesellschaft. Es wird sich die Frage stellen: Wie weit ist man bereit, sich den „Entscheidungen“ technische Systeme anzuvertrauen.

### **1. Ausgangssituation**

Herausragendes Ziel technischer Entwicklungen ist es, den Komfort und die Sicherheit für den Menschen zu erhöhen. Insbesondere in den letzten 10 bis 20 Jahren wurde Sicherheit zunehmend zu einem treibenden Element technologischer Entwicklung. Dabei steht das deutsche Wort „Sicherheit“ für zwei unterschiedliche Gruppen von Aufgaben, die im Angelsächsischen mit „Safety“ und „Security“ beschrieben werden.

Sicherheit im Sinne von Security beinhaltet die Sicherheit von Menschen vor kriminellen und terroristischen Anschlägen, d.h. in der Regel dem bewussten Missbrauch moderner Techniken.

Sicherheit im Sinne von Safety bedeutet den Schutz vor Schäden, die durch das Versagen technischer Anlagen oder Verkehrsmittel entstehen können. Dies schließt auch ungewollte Fehlbedienungen und menschliches Versagen mit ein. Das Versagen von technischen Anlagen ist in der Regel auf

- nichtregelkonformen Gebrauch der Systeme,

- Überlastung,
- äußere, von Menschen nicht zu beeinflussende Umstände,
- Material- oder Konstruktionsfehler,
- Veränderung der auslegungsbedingten Werkstoffeigenschaften durch Alterungsprozesse wie Ermüdung oder Korrosion

zurückzuführen. Im Interesse der Material- und Energieeffizienz wird angestrebt, Werkstoffe und Bauteile möglichst vollständig auszunutzen. Dennoch sind Sicherheitszugaben beim Design unumgänglich und insbesondere sicherheitsrelevante Baugruppen müssen regelmäßig inspiziert oder gegebenenfalls ausgetauscht werden. Dies kann einen nicht unerheblichen Aufwand beim Betreiben der Anlagen oder Fahrzeuge bewirken.

In der Energietechnik versteht man unter Zustandsüberwachung die periodische zerstörungsfreie Prüfung der Baugruppen. Der Trend geht jedoch in Richtung einer kontinuierlichen sensorischen Überwachung der Belastung sowie des Werkstoff- und Bauteilzustands während des Betriebs. Dies erfordert die Integration von Sensoren in das Bauteil und die Kommunikation zwischen Sensoren und Überwachungssystem durch Sensornetzwerke. Für diesen moderneren Begriff der Zustandsüberwachung wird im Angelsächsischen der Begriff Structural Health Monitoring („Strukturgesundheitsüberwachung“) verwandt. Da es hierfür noch keinen adäquaten deutschen Begriff gibt, wird im Folgenden weiter die angelsächsische Abkürzung „SHM“ benutzt. Die Vorteile dieser neuen Technik liegen auf der Hand und gehen weit über eine hohe Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der überwachten Systeme und Anlagen hinaus.

- Bereits in der Phase der Bauteilentwicklung lassen sich diese Techniken bei beschleunigten Strukturtests anwenden.
- Wartungszyklen können verlängert und die Wartungszeiten reduziert werden.
- Man kann von regelmäßigen zu zustandsabhängigen Wartungen (condition based maintenance) übergehen.
- Überwachte Systeme lassen sich länger betreiben und die zur Verfügung stehende Materialreserve voll ausnutzen.
- Der Weiterverkaufswert überwachter Fahrzeuge wird sich erhöhen, was einen direkten Vorteil für den Betreiber darstellt.
- Schließlich kann bei Systemen, die vollständig mit Sensorik überwacht werden, auf Sicherheitszugaben verzichtet bzw. diese können reduziert werden, wodurch ein optimiertes Design und damit eine erhebliche Gewichts- und Energieeinsparung (das heißt auch reduzierte Emissionen) ermöglicht werden.

## 2. Eine neue Ära kündigt sich an

„Intelligente“, mit sensorischen und aktuatorischen Fähigkeiten ausgestattete Werkstoffe und Bauteile werden unsere technische Entwicklung in der Zukunft revolutionieren. In einer historischen Betrachtung (siehe Abbildung 1) könnte man davon sprechen, dass ein neues Zeitalter der technischen Entwicklung beginnt. Das 19. Jahrhundert wird im Allgemeinen als Zeitalter der Industrialisierung bezeichnet. Charakterisiert war es dadurch, dass Maschinen gebaut wurden, die

menschliche Muskelkraft ersetzen. Voraussetzungen dafür waren technische Entwicklungen und Erfindungen, die viele Jahre früher stattfanden. So gab es im ersten Jahrhundert u.Z. von Heron von Alexandria Versuche, Dampf für mechanische Bewegung zu nutzen. Die Entwicklung der Dampfmaschine geht letztlich auf Thomas Newman und James Watt zurück.

Während des Zeitalters der Industrialisierung entwickelte sich die Kommunikation zunächst mit einfachen Telegrafen, elektromagnetischen Morsetelegrafen oder Bildtelegrafen um 1900. Bereits 1909 gab es den Nobelpreis für drahtlose Kommunikation. Dennoch bedurfte es einer fast 100jährigen Entwicklung, bis diese Techniken so ausgereift waren, dass sie zum integrierten Bestandteil unseres Lebens wurden. Dieses Zeitalter der Informationstechnik ist dadurch gekennzeichnet, dass große Mengen an Informationen und Daten jederzeit verfügbar und schnell übertragbar sind. Sie stellen damit ein Werkzeug für das menschliche Erinnerungsvermögen dar.

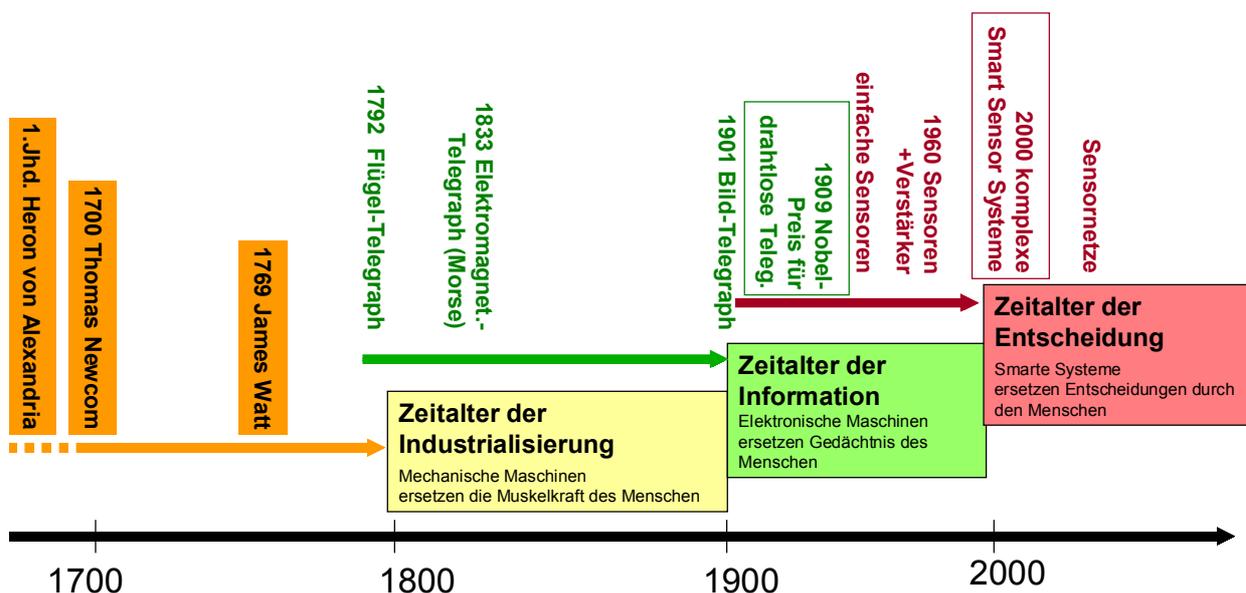


Abb. 1: Ein neues Zeitalter bricht an

In der nun beginnenden Ära werden wir Maschinen und technische Systeme entwickeln, die mit Sinnesorganen ausgestattet sind, die sich und ihre Umgebungsbedingungen ständig überwachen und diagnostizieren können und gegebenenfalls hierauf reagieren und sich eventuell sogar selbst reparieren können. Dem Menschen werden damit viele Entscheidungen abgenommen, ohne die technische Systeme bisher nicht sicher und zuverlässig funktionieren konnten. Die Zukunft wird auch dieser technologischen Epoche einen Namen geben. Ich möchte hier den Arbeitstitel „Zeitalter der Entscheidungen“ (age of decisions) verwenden.

Was wir gegenwärtig als SHM bezeichnen, wird nur der Anfang einer technologischen Entwicklung sein, die sich letztlich ebenso revolutionär auf das menschliche Leben auswirken wird, wie die Informationstechnik.

### 3. SHM – warum gerade jetzt?

Die Idee einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung mittels Sensorik ist nicht neu, scheint aber gerade jetzt zum Durchbruch zu gelangen. Bereits in den zurückliegenden Jahrzehnten wurden

beispielsweise kritische Komponenten kerntechnischer Anlagen permanent sensorisch überwacht [1]. Das Gleiche gilt auch für kritische Chemieanlagen und ähnliche Ausrüstungen. Sensoren wurden in der Vergangenheit auch für Echtzeit-Prozess-Überwachung eingesetzt [2]. Für komplizierte Überwachungstechniken, wie sie z.B. die Ultraschallprüfung darstellt, waren jedoch die technischen Ausrüstungen deutlich zu teuer, um sie wirtschaftlich in größerer Stückzahl in Anlagen fest zu installieren. Für die Anwendung in Fahrzeugen und im Leichtbau waren derartige Systeme schon aufgrund von Größe und Gewicht ungeeignet.

Erst seit wenigen Jahren sind leistungsfähige digitale Signalprozessoren und drahtlose Kommunikationstechniken verfügbar, die es ermöglichen, kleine, in Bauteile integrierbare Sensorsysteme herzustellen, die ohne aufwändige Verkabelung auskommen [3]. Bezogen auf das Jahr 1990 wird sich die Zahl der Operationen, die digitale Signalprozessoren pro Sekunde realisieren, im Jahr 2010 mehr als vertausendfacht haben. In etwa gleichem Maße wird der verfügbare Speicher steigen. Die Preise der Systeme werden jedoch nur noch ein Prozent des Preises von 1990 betragen. Dies berücksichtigt noch nicht die Inflationsrate [4]. Entscheidend für den Einsatz energieautarker Systeme ist auch die Reduzierung des Energieverbrauchs, der sich in Milliwatt pro Millionen Operationen pro Sekunde auf ein Zehntausendstel reduziert haben wird.

Damit sind wir heute in der Lage, nicht nur Sensoren sondern auch komplexe Messsysteme, die noch vor Jahren in voluminösen Gehäusen untergebracht werden mussten, in Aufbaugrößen von wenigen Kubikmillimetern unterzubringen [5, 6]. Im Gegensatz zu den früheren Systemen besitzen heutige intelligente Sensoren nur einen geringen Energieverbrauch, der über langlebige Batterien oder „energy harvesting systems“ zur Verfügung gestellt werden kann [7, 8]. Die Datenkommunikation kann über drahtlose Schnittstellen realisiert werden (Abbildung 2).

**Konventionelles akustisches Datenaufnahme- und analysesystem**



**CPCL-System mit Modulen für Signalaufnahme und Analyse**

→ **4-kanaliges akust. System (heute)**



**Netzwerkknoten basierend auf FR4-Technologie**

→ **Match-X-Modul**



**Netzwerkknoten basierend auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Technologie**

Abb. 2: Miniaturisierung komplexer Prüfsysteme am Beispiel einer Mehrkanalultraschall-elektronik des Fraunhofer IZFP Dresden

Neben der wachsenden Speicherkapazität und Prozessorgeschwindigkeit, dem reduzierten Energieverbrauch, den fallenden Preise und der drahtlosen Kommunikation kommt noch ein weiterer Aspekt hinzu, nämlich die internationale Vernetzung („networking“) von Spezialisten. So ist es möglich, dass in Echtzeit nicht nur Informationen und Daten, die im Prozesssystem gespeichert

oder in einem Labor verfügbar sind, zur Auswertung von Messsignalen herangezogen werden können, sondern dass ein Zugriff auf Datenbanken weltweit in Echtzeit erfolgen kann.

#### 4. Das Konzept

Das Konzept wird schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Eine Vielzahl von Sensoren überwacht sowohl die Einsatzbedingungen als auch den Werkstoffzustand, entweder während des Einsatzes oder periodisch während des Stillstands des Systems (z.B. eines Flugzeuges auf dem Rollfeld). Die Sensorsysteme sind miteinander vernetzt und kommunizieren untereinander, d.h., Anlagen oder Fahrzeuge enthalten ein System vergleichbar dem Nervensystem des Menschen [9].

Entscheidender Unterschied zu früheren Techniken der zerstörungsfreien Prüfung ist, dass die Sensorsysteme am Messort verbleiben, d.h. in die Struktur integriert werden. Die Messdaten stehen nun zum einen lokal, d.h. im Messsystem selbst, zur Verfügung, sie können aber auch durch drahtlose Kommunikation an ein externes Prüfsystem oder eine Überwachungsstelle kontinuierlich oder während periodischer Abfragen übermittelt werden.

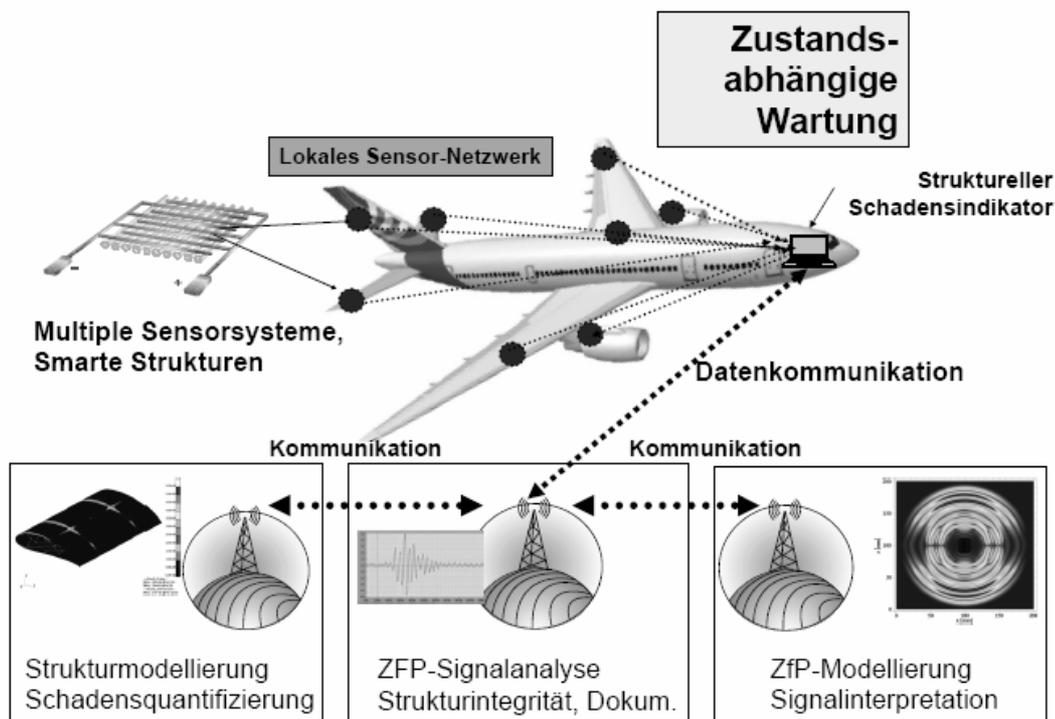


Abb. 3: Das SHM-Konzept

Die Sensorsysteme können als lokale Überwachungssysteme, beispielsweise an kritischen Positionen, das Entstehen von Rissen kontrollieren. Sie können aber auch gesamte Baugruppen überwachen. Hierzu sind zum einen optische Fasersensoren in der Entwicklung [10]. Effizient lassen sich auch akustische Systeme auf der Basis von „geführten Wellen“ anwenden [11]. Die ermittelten Messdaten müssen zunächst vorverarbeitet werden, was üblicherweise durch die im Sensorsystem befindlichen Signalprozessoren erfolgt. Die detaillierte Signalanalyse kann an einer Relaisstation

oder Überwachungsstelle vorgenommen werden. Hierzu stehen über das WWW Informationen und Ressourcen weltweit – z.B. zur Modellierung von zerstörungsfreien Prüftechniken oder zur Strukturmodellierung – zur Verfügung. Damit ist auch für komplexe Systeme eine Integritätsausgabe in Echtzeit möglich.

Die Entwicklung und der Einsatz solcher SHM-Techniken erfordert, den technischen Fortschritt an vorderster Front auf verschiedenen Fachgebieten gleichzeitig zu nutzen. So sind neue Messprinzipien erforderlich, die teilweise aufbauend auf bekannten Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung Daten über den Werkstoff, Werkstofffehler oder Werkstoffveränderungen liefern können. Die Leistungsfähigkeit der Systeme hängt vor allem vom Fortschritt der Mikroprozessoren und Speichertechnik ab. Ein noch ungelöstes Problem ist der Nachweis der Langlebigkeit und Zuverlässigkeit solcher Sensorplattformen [12].

Wirtschaftlich wird SHM nur sein, wenn leicht applizierbare Sensorsysteme zu niedrigen Preisen zur Verfügung stehen. Hierzu sind neue Konzepte der Aufbau- und Verbindungstechnik beispielsweise unter Einbeziehung von Polymerelektronik erforderlich. Neue Techniken der Datenakquisition und Signalverarbeitung sind zu entwickeln. Beispiele hierfür sind die akustische Tomographie [13] oder die Random Acoustic Noise Technique (RANT) [14], die ähnlich wie passive Radarsysteme lediglich durch die Messung von Schallemissionen und Betriebsgeräuschen eine Rekonstruktion einer Komponente und das Erkennen von Fehlern ermöglichen sollen.

Neue, robuste Sensoren und Techniken zum Einbetten dieser Sensoren in die Struktur sind zu entwickeln. Derzeit bevorzugt erprobt werden Glasfasersysteme oder piezoelektrische Systeme basierend auf Faserstrukturen. Die eingebetteten Sensoren dürfen natürlich nicht die Integrität der Bauteile beeinflussen. Insbesondere Kompositwerkstoffe sind geeignet, um faserartige Sensoren zu integrieren. Damit kann das gesamte Bauteil sensorische Eigenschaften erhalten.

Da das Programmieren einzelner Sensorknoten viel zu aufwändig ist, werden neue Netzwerkkonzepte nötig sein, die eine beliebige Anzahl von Sensorsystemen automatisch integrieren können und auch den Ausfall einzelner Systeme tolerieren. Zur Übertragung der Daten zwischen Zwischensensorknoten aber auch zwischen SHM-System und Außenwelt sind telemetrische Verfahren in der Entwicklung.

Schließlich werden neue Konzepte für die Energieversorgung benötigt. Derzeit werden leistungsfähige Batteriesysteme entwickelt, die eine Einsatzdauer von mehreren Jahren versprechen. Aber auch die Energieerzeugung mittels piezoelektrischer oder magnetoinduktiver „energy harvesting systems“, thermoelektrischer Generatoren oder weiterer Verfahren wird diskutiert. Aussichtsreich sind auch passive Systeme, die ihre Energie durch externe Quellen, z.B. durch Einstrahlen von Magnetfeldern, erhalten [15].

Ein wesentlicher Aspekt wird auch die Bewertung der Befunde sein. Aus Prüfsignalen müssen Aussagen über Werkstoffstruktur, Eigenschaften und Fehler gewonnen werden, um hieraus wiederum Informationen über Bauteilintegrität, zu erwartende Lebensdauer und möglichen Weiterbetrieb der Komponente bis zur nächsten Instandsetzung ermitteln zu können.

Neben sehr aufwändigen elektronischen Lösungen sind aber auch ganz interessante alternative Konzepte in der Diskussion. Beispielsweise wurde von der NASA ein Beschichtungssystem mit fluoreszierenden Stoffen entwickelt, das bei geeigneter Beleuchtung die Schädigung von Beschichtungen oder Risse durch Fluoreszenz anzeigt [16].

Die Fragen der Aktuatorik, d.h. adaptiver Werkstoffe und Komponenten, sollen in diesem Beitrag nicht ausführlich behandelt werden. Dies stellt aber einen ebenso wichtigen Zweig der Entwicklung dar wie die Sensorik [17]. Gemeint sind Werkstoffe mit aktuatorischen Fähigkeiten, d.h. Stoffe, die durch externe Einflüsse oder elektrische Signale ihre Form verändern oder sich an Umweltbedingungen anpassen können. Beispiele hierfür sind piezoelektrische Systeme [18], Formgedächtnislegierungen [19] aber auch selbstreparierende Beschichtungen [20].

## 5. Die Roadmap

<b>Zustandsüberwachung</b>			
<i>Zu überwachen</i> •Schwingungen •Spannungen •Temperaturen •Schäden •Vollständigkeit/ Integrität	<i>Detektionsprinzipien</i> •Fiber Bragg Grating •Schwingungs- aufnehmer •Dehnmessstreifen •Akustische Emission •optisch (CCD) •Infrarot-Abbildung •RFID	<i>Überwachung des Betriebszustands</i> •normalerweise passiv •keine externe Stimulierung •keine Signal- übertragung	<i>Aktuelle Trends</i> •Strukturintegration der Sensoren •Sensornetzwerke •telemetrische Systeme •smarte Strukturen •Eigenreparatur
<b>Zerstörungsfreie Prüfung</b>			
<i>Zu überwachen</i> •Materialfehler •Risse •Interne Volumendefekte •Eigenspannungen •innere Materialeigenschaften •Mikrostruktur •...	<i>Detektionsprinzipien</i> •Ultraschall •Röntgen- und Gammastrahlen •Wirbelstrom •Magnetische Streiffelder •Eindringprüfung •Aktive Thermographie •Mikrowellen •...	<i>Lokalisierung von Defekten, Schäden, Schwächung und Materialeigenschaften</i> •normalerweise aktiv •für die Qualitätssicherung •periodische Inspektion •keine Signalübertragung	<i>Aktuelle Trends</i> •neue Techniken (optisch, Terahertz) •berührungslose Techniken •Miniaturisierung •Multi-Sensortechnik, lokale Sensortechnik •abbildende Verfahren und tomographische Rekonstruktion
<b>Modellierung, Zuverlässigkeit, Betriebsfestigkeit</b>			
<i>Zu beachten</i> Statische und dynamische Modellierung: •thermische und mechanische Belastung •Betriebsbedingungen •elastisches/plastisches Materialverhalten •Temperaturfelder •Spannungsverteilungen •Schadensentwicklung	<i>Methoden</i> •analytische Lösungen •„Finite Element Codes“ •„Finite Volume Codes“ •Nanosimulation	<i>Lebensdauerprognose</i> •basierend auf Materialeigenschaften entsprechend Entwurfsregeln •experimentelle Überprüfung der Belastungsbedingungen und Materialeigenschaften und -fehler ist erforderlich	<i>Aktuelle Trends</i> •Berücksichtigung von Betriebsdaten durch eingebettete Sensoren •adaptive Strukturen •Health Control (Fraunhofer LBF) •selbsteilende Materialien und Strukturen

<b>Sensortechnologie</b>			
<i>Zu messen</i>	<i>Sensorprinzipien</i>	<i>Transformation chemischer und physikalischer Einheiten in elektrische Signale</i>	<i>Aktuelle Trends</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Temperatur</li> <li>•el./magnetisches Feld und Strahlung</li> <li>•Druck, Kraft</li> <li>•Schwingungen, Beschleunigung</li> <li>•Spannung, Strom</li> <li>•chem. Zusammensetzung</li> <li>•Schadensprozess (Korrosion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Widerstand/Leitfähigkeit</li> <li>•Piezoelektrizität</li> <li>•thermoelekt. Effekt</li> <li>•elektrische Induktion</li> <li>•photoelektrischer Effekt</li> <li>•Spektroskopie</li> <li>•el. /mag. Rauschen</li> </ul>	Überwachung von: <ul style="list-style-type: none"> <li>•Belastung</li> <li>•Entfernung und Lage</li> <li>•Umweltparametern</li> <li>•aktiven Verschleißprozessen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•intelligente Sensoren mit integrierter Signalanalyse, Datenspeicherung, Stromversorgung</li> <li>•Multi-Sensoren und Sensornetzwerke</li> <li>•Selbstkalibrierung und Eigendiagnose</li> <li>•Miniaturisierung und Energieunabhängigkeit</li> </ul>

Tab. 1: Ressourcen für SHM

Der Fortschritt dieser neuen Technik hängt von einer Vielzahl technologischer Entwicklungen unter Beteiligung zahlreicher Fachgebiete ab. Die wichtigsten Ressourcen sind die klassische Zustandsüberwachung, d.h. das „Condition Monitoring“, die zerstörungsfreie Prüfung, die Sensortechnik sowie die Strukturmodellierung zur Ermittlung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer überwachter Systeme. Arbeitsgebiete und Entwicklungstrends werden in Tabelle 1 zusammengefasst.

Durch Zusammenführung dieser Kompetenzen entsteht das neue Arbeitsgebiet des „Structural Health Monitoring“ (SHM) (siehe Abbildung 4).

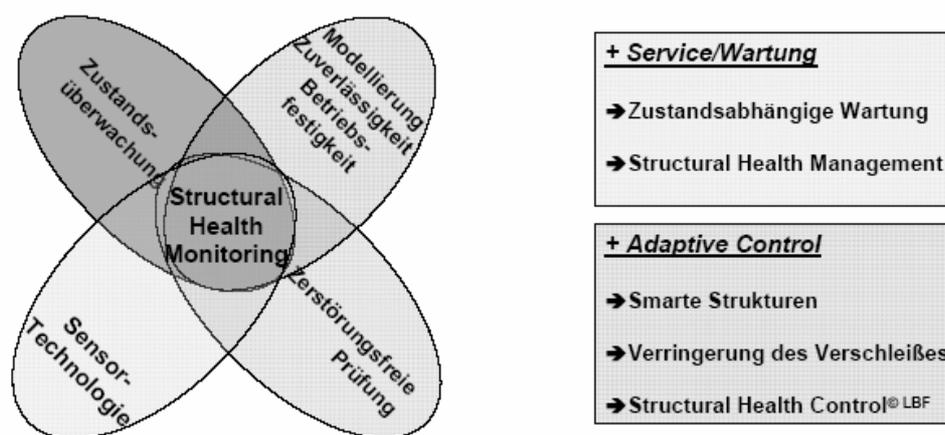


Abb. 4: SHM eine multidisziplinäre Aufgabe

Prototypen von Sensorknoten und Überwachungssystemen sind weltweit in verschiedenen Laboratorien verfügbar und erste Tests werden bereits durchgeführt. Diese bauen auf den Konzepten des klassischen „Condition Monitoring“ auf. Derartige Systeme sind beispielsweise für Windkraftanlagen bereits im Großeinsatz [21]. Ein Beispiel für ein Überwachungssystem für Hochgeschwin-

digkeitszüge zeigt Abbildung 5. Hier wird ein Sensorsystem in die Hohlwelle eines Eisenbahnrades integriert. Dieses Sensorsystem ist in der Lage, Fahrgeräusche zu überwachen, aber auch mit Hilfe akustischer Techniken Risse und Brüche in Wellen und Rädern zu erkennen. Die Daten werden an Bord verarbeitet und beim Passieren von Relaisstationen telemetrisch an eine Leitzentrale übertragen [22]. Systeme zur Radsatzüberwachung werden in den nächsten Jahren in Großversuchen erprobt und noch in diesem Jahrzehnt serienmäßig eingesetzt werden. Ähnlich ehrgeizige Ziele gibt es in der zivilen Luftfahrt [23]. In der militärischen Luftfahrt sind bereits Prototypsysteme beispielsweise zum Überwachen von Korrosions- und Ermüdungsschäden in der Erprobung [24]. Dabei können solche Systeme entweder Werkstoffschädigungen oder Belastungen direkt messen oder schädigende Bedingungen wie Lastzyklen oder korrosive Beanspruchung erfassen.

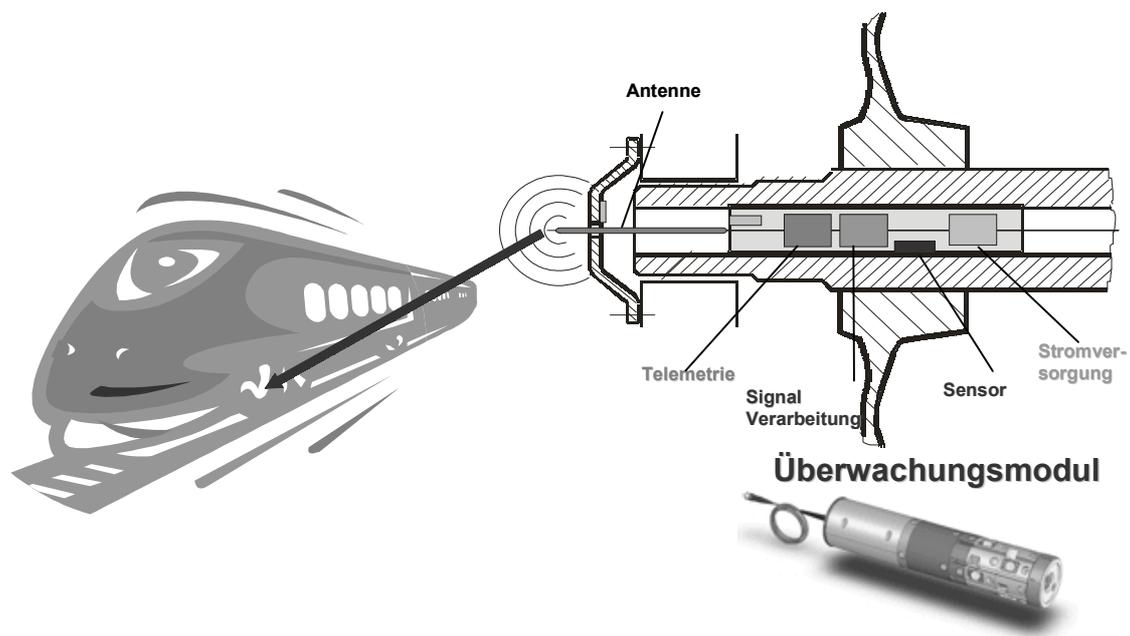


Abb. 5: Laborprototyp eines Überwachungssystems für Hochgeschwindigkeitszüge

Das Endziel sollte eine Lebensdauerprognose für die zu überwachenden Bauteile und Ausrüstungen sein. Einfache Überwachungstechniken sind Autofahrern sicher bereits aus ihren Fahrzeugen bekannt; die Autoindustrie arbeitet mit Hochdruck an leistungsfähigen Überwachungssystemen für die Fahrzeuge.

## 6. Der Versuch einer Prognose

Wie eingangs dargelegt, sind diese Entwicklungen lediglich der Anfang einer neuen industriellen Ära, in der technische Systeme durch sensorische und aktuatorische Fähigkeiten selbst in der Lage sind, ihren Zustand zu bewerten und Entscheidungen über den weiteren Einsatz zu treffen. In wenigen Jahren werden auch erste selbst reparierende Systeme verfügbar sein. Zunächst geht es hier um das Verschließen von Schädigungen in Schutzbeschichtungen oder ähnliches [20]. Man arbeitet aber auch bereits an kleinen Robotersystemen zur Selbstdiagnose und Reparatur. Der Fortschritt solcher „intelligenter“ Maschinen wird aber neben technologischen und ökonomischen Faktoren auch von soziologischen Aspekten abhängen. Wie weit werden Menschen bereit sein,

ihre Sicherheit von den „Entscheidung“ von Maschinen (deren Funktionen sie in der Regel im Einzelnen nicht mehr durchschauen) abhängig zu machen. Unter Umständen können haftungsrechtliche oder versicherungstechnische Fragen die Entwicklung solcher Techniken nachhaltig unterstützen oder auch behindern.

In Abbildung 6 wird der Versuch unternommen, einen Trend für die nächsten 20 Jahre zu prognostizieren. Basierend auf bereits vorliegenden Roadmaps für die Bahn, die Luftfahrt, die Automobilindustrie, die Windkraftanlagentechnik u.a. können wir davon ausgehen, dass weiterhin neue Sensorprinzipien entwickelt werden, dass der Schwerpunkt sich jedoch in Richtung intelligenter Sensoren, d.h. Sensoren die Signalverarbeitung und Kommunikation beinhalten, verlagern wird. Sensoren werden zunehmend in selbstorganisierenden Netzwerken arbeiten. Ein weiterer wichtiger Trend ist die Aktuatorenentwicklung und die Entwicklung von so genannten „Smart Materials“, d.h. Werkstoffen mit sensorischen und aktuatorischen Fähigkeiten. Eines der bekanntesten Produkte aus derartigen Materialien ist die Dieseleinspritzpumpe, die eine optimale Kraftstoffverbrennung und damit einen reduzierten Kraftstoffverbrauch bei besserer Motorleistung ermöglicht [25].

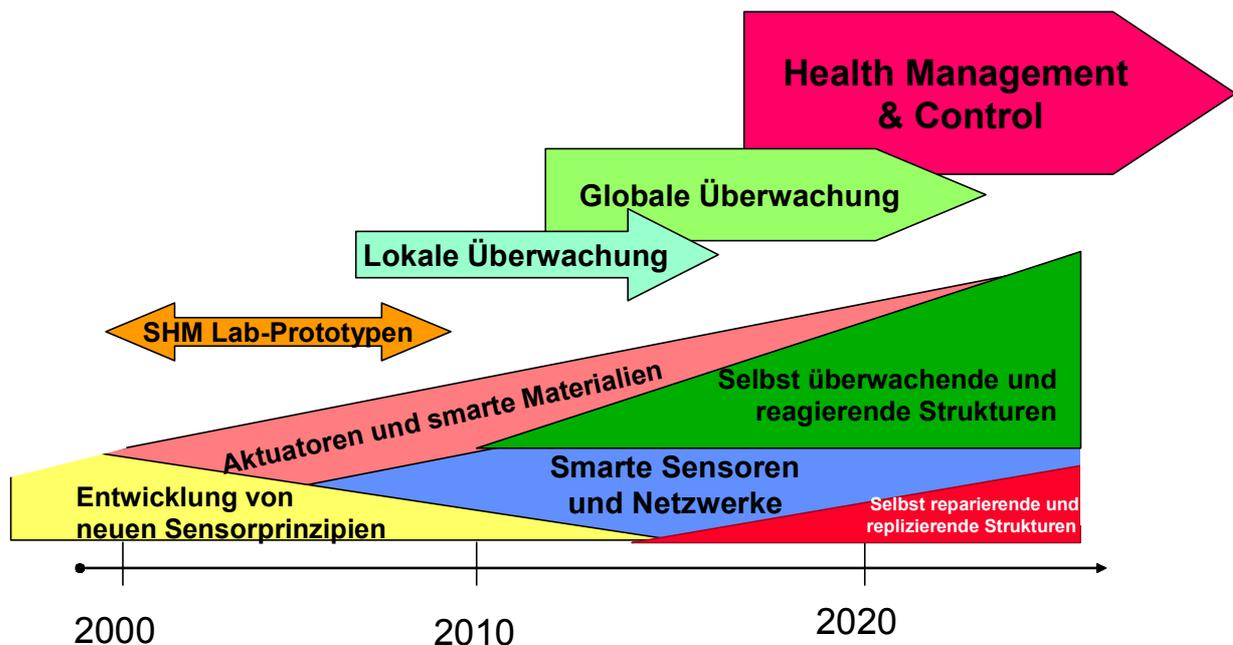


Abb. 6: Versuch einer Prognose

Dient die Sensorik zunächst der Überwachung, d.h. der Ergänzung und Erweiterung der derzeitigen Bauteilüberwachung basierend auf periodischen Inspektionen, so wird in Zukunft auch eine Reaktion des Systems auf registrierte Ereignisse möglich sein. So könnte beispielsweise bei detektierten Schäden das Fahrverhalten eines Fahrzeugs so verändert werden, dass die geschädigte Struktur weniger belastet wird. Aber auch aktuatorisches Verhalten zur Reduzierung von Schädigungen, z.B. durch Schwingungsdämpfung oder Optimierung des Lastflusses, wird künftig zum Einsatz kommen. Hierfür wurde der Begriff „Structural Health Control“ geprägt [17].

Jedoch sind auch noch weitergehende Lösungen vorstellbar. So sollten künftig auch selbst heilende und reparierende Strukturen, wie wir sie beispielsweise in der Biologie kennen, möglich werden.

## Zusammenfassung

Fortschritte der Sensorik und Mikroelektronik ermöglichen es, leistungsfähige Sensorsysteme wirtschaftlich einzusetzen, um Industrieanlagen, Fahrzeuge oder auch Konsumgüter kontinuierlich zu überwachen. Gegenwärtig befinden wir uns im Stadium der Laborprototypen und Großversuche. Erste lokale Sensorsysteme, die kritische Zonen eines Fahrzeugs überwachen, werden bereits in diesem Jahrzehnt industriell zum Einsatz kommen. Roadmaps sehen vor, dass aber bereits in 10 Jahren globale Überwachungssysteme für Fahrzeuge oder technische Ausrüstungen verfügbar sein werden.

Dies wird neben einer erhöhten Verfügbarkeit und Sicherheit der Systeme zu einer besseren Material- und Energieausnutzung führen und Betriebskosten senken. Völlig neue Designregeln sind zu erarbeiten, die die Dauerüberwachung mit berücksichtigen. Dies wird zu völlig neuen technischen Lösungen führen. Wir stehen damit am Beginn einer neuen technologischen Ära, in der Maschinen und technische Ausrüstungen gebaut werden können, die sich selbst diagnostizieren, auf Belastungen reagieren und reparieren können. Eigenschaften, die bisher nur für Lebewesen kennzeichnend sind. Die Einführung dieser neuen Techniken erfordert neben der Lösung naturwissenschaftlich-technischer, logistischer und wirtschaftlicher Fragestellungen auch die Beachtung soziologischer und rechtlicher Aspekte.

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU 1996-455, 1996-456
- [2] Theiner, W.; Kern, R.; Graus, M., Process Integrated Nondestructive Testing (PINT) for Evaluation of Hardness, Case Depth and Grinding Defects, Advanced Sensors for Metals Processing (1999), S. 159-171, Annual Conference of Metallurgists of CIM Gateway to the 21st Century, 22–26 August, 1999, Québec, Canada
- [3] Wansch, R., Small antennas for wireless micro-systems: requirements, state of the art, future trends, Active and Passive Electronic Components, Vol. 25 (2002), No. 1, pp. 71-82
- [4] <http://www.ece.umd.edu/courses/enee759m.S2002/papers/frantz2000-micro20-6.pdf>
- [5] Thomasius, R.; Niedermayer, M. Polityko, D.-D.; Schrank, K.; Guttowski, S.; John, W.; Reichl, H., Entwurf kleinster energieautarker Funksensoren, Fachtagung „Sensoren und Messsysteme“ 13, 2006, Freiburg/Brsg.
- [6] Schubert, L., Frankenstein, B., Reppe, G., Match-X Based Microsystems for Structural Health Monitoring, 9<sup>th</sup> European Conference on Nondestructive Testing (ECNDT), Berlin, Germany, 2006
- [7] Gebhardt, S.; Seffner, L.; Schlenkrich, F.; Schönecker, A., PZT thick film for microsystems applications, Society for Microelectronics, Electronic Components and Materials -MIDEM-, Ljubljana, Konferenz „European Microelectronics and Packaging Symposium with Table-Top Exhibition (EMPS)“, 4, 2006, Terme Catez
- [8] Röding, T.; Schönecker, A.; Daue, T.; Esler, W. Piezoelektrische Energiequellen für low-power Elektronik, Adaptronic Congress 2004 „Entwicklung und Realisation adaptiver Systeme“, Hildesheim
- [9] Speckmann, H.; Henrich, R., Structural Health Monitoring (SHM) – Overview on Airbus Activities, WCNDT, Aug 30–Sep 3, 2004, Montreal, Canada
- [10] Niemann, J.; Habel, W.; Hille, F., Complex monitoring system for long-term evaluation of prestressed bridges in the new Lehrter Bahnhof in Berlin, 2nd International conference „Re-

- liability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and Means 2005“, July 7–8, 2005, Pardubice, Czech Republic
- [11] Frankenstein, F.; Schubert, F.; Hentschel, D.: Guided waves for SHM application, SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials and NDE for Health Monitoring and Diagnostics, 26 February–2 March, 2006, San Diego, USA
- [12] Michel, B., Microreliability, Nanoreliability – Reliability approach for the micro-nano interface region, International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems & Components, October 5-6, 2005, Munich, Germany
- [13] Schubert, F., Tomography Techniques for Acoustic Emission Monitoring, Proc. of 9th European Conference on Nondestructive Testing (ECNDT), Berlin, Germany, September 25–29, 2006
- [14] Schubert, F., Tomography Techniques for Acoustic Emission Monitoring, 9th European Conference on Nondestructive Testing (ECNDT), Berlin, Germany, September 25–29, 2006
- [15] Zimmermann, W.; Mäder, J., Structure Condition monitoring with passive tags, Structural health monitoring 2006, Proc. of the third European workshop, Granada, Spain, July 5–7, 2006
- [16] Bencic, T.J.; Eldridge, J.I., Smart Coatings for Health Monitoring and Nondestructive Evaluation, Proc. 10th SPIE's International Symposium on Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics, Volume 5767, San Diego, California, March 6–10, 2005
- [17] Hanselka, H., Adaptronics – the Fraunhofer Innovation Topic (FIT), Proc. Adaptronic Congress 2006, May 03–04, Göttingen, Germany
- [18] Schönecker, A.; Gesemann, H.-J.; Seffner, L., Low-Sintering PZT-Ceramics for Advanced Actuators, ISAF '96, The Tenth International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, Rutgers, The State University of New Jersey, Piscataway NJ, August 18–21, 1996
- [19] Bi, C.C.; Shaw, J.A.; Iadicola, M.A., Thermodynamics of shape memory alloy wire: modeling, experiments, and application, Continuum Mechanics and Thermodynamics, Vol. 18 (2006), No. 1-2, pp. 83-118
- [20] Rösner, H., Airbus „intelligent“ airframe, 2nd Dresden Airport Seminar on Reliability, Testing, Monitoring of Aerospace Components, Dresden, Germany, November 15, 2006
- [21] www.skf.com
- [22] Frankenstein, B.; Hentschel, D.; Schubert, F.; Pridöhl, E., Hollow Shaft Integrated Monitoring System for Railroad Wheels, 10th SPIE Annual International Symposium on Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics, Vol. 5770, pp. 46-55, 6–10 March, 2005, San Diego, USA
- [23] Speckmann, H.; Brousset, C., Structural Health Monitoring (SHM) a future alternative to conventional NDT?, 2006 49th Annual NDT Forum – Fort Worth, Texas, 17–19 October, 2006
- [24] Davis, G.D.; Dacres, C.M.; Shook, M.; Wenner, B.S., Electrochemical In-Situ Sensors for Detecting Corrosion on Aging Aircraft, <http://www.daccosci.com/FASTPAP.htm>
- [25] Meixner, H., Sensorsystems for industrial and automotive applications, Proc. of the IEEE Sensors 2004, Vienna, Austria, 24–27 October, 2004

[04.05.07]

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Norbert Meyendorf  
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZP D)  
Krügerstr. 22  
D – 01326 Dresden