Lebensdauermanagement von Strukturen und Systemen und die Rolle der zerstörungsfreien Prüfung

Christian BOLLER,
Fraunhofer IZFP Saarbrücken & Dresden
Lehrstuhl für zerstörungsfreie Materialprüfung und Qualitätssicherung, Saarbrücken

Kurzfassung. Die zunehmende Anzahl alternder Infrastruktur verbunden mit knapper werdenden Finanzen macht Lebensdauermanagement dieser Infrastruktur zu einer steigenden Notwendigkeit. In dem Beitrag wird aufgezeigt, dass in diesem Zusammenhang eine ganzheitlich Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus einer Bauteilstruktur bzw. eines Systems gemacht werden muss. Dazu gehört die Erfassung der realen Betriebslasten, über die Vorhersagen möglicher Schädigungsorte gemacht werden können. Ist dies geschehen, so kommt zerstörungsfreie Prüfung (zfP) zum Tragen. Mit den neueren Verfahren der Zustandsüberwachung (Structural Health Monitoring) kann dann u.a. kontinuierlich und in situ der Schädigungszustand erfasst werden. Wann und wie dies wirtschaftlich sinnvoll zu erfolgen hat, bedarf einer weiteren Prozessanalyse. Verfahren und Vorgehensweisen hinsichtlich einer solchen Lebenszyklusbetrachtung werden anhand praktischer Beispiele erläutert.

Einführung

Die Welt der Ingenieurtechnik ist voll an Systemen und Strukturen. Viele von ihnen sind teuer in der Anschaffung und haben vielfach ihre Bemessungslebensdauer erreicht, wenn nicht sogar schon überschritten. Man denke nur an Brücken, Straßen, Häuser, Schiffe, Flugzeuge, Eisenbahnen, Schwermaschinen, Reaktoren und vieles andere. Viele dieser Strukturen sind noch in einem voll funktionstüchtigen Zustand, obwohl sie eigentlich nach den Regeln der Bemessungskunst ausgetauscht werden müssten. Die Gründe für diesen Zustand sind mannigfaltig und reichen von geringer Nutzung und Beanspruchung bis hin zu guter Wartung und/oder überproportionaler Bemessung bzw. überproportional guter Werkstoffeigenschaften. Jeder Eigentümer einer solchen Struktur möchte daher den entsprechenden Mehrwert aus einer solchen Struktur ziehen, besonders dann, wenn die Struktur mit einem hohen Anschaffungspreis verbunden ist, wie z.B. bei einem Flugzeug, einem Reaktor oder einem Gebäude. Diese Vorteilsnahme ist möglich, wenn man sich den Lebenszyklus der jeweiligen Struktur genauer betrachtet und dementsprechend ein Lebensdauermanagement einführt.

Neuere Analyseverfahren erlauben es zwischenzeitlich den Lebenszyklusprozess einer Struktur besser zu erfassen. Wurden früher Bauteile für eine zeitlich festgelegte Lebensdauer unter Berücksichtigung von mit hohen Sicherheitsfaktoren beaufschlagten Lastspektren bemessen, so kann heute zunehmend eine mehr beanspruchungs- und schädigungsgerechte und damit eine weniger auf die Nutzungszeit festgelegte Bemessung erfolgen. Neuere, preisgünstigere und kleinere Sensorik kann durch verbesserte Werkstoff- und Fertigungsmethoden auf und teilweise sogar in Strukturbauteile integriert werden und er-

möglicht somit eine Erfassung des Beanspruchungs- und Schädigungszustandes des Bauteils quasi in Echtzeit. Die damit verbundene Idee, im Englischen auch als ‚Structural Health Monitoring' (SHM) bezeichnet, erinnert quasi an Gegebenheiten in der Natur, wo jede Struktur mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet ist, deren Information dann in einem Gehirn zentral verarbeitet wird. Dieses Modell aus der Biologie kann zwar der Inspiration dienen, allerdings nicht 1:1 auf die Ingenieurtechnik übertragen werden. Während die Prinzipien der Sensorik in der Biologie auf einer Maximierung der Sensorzahl, Minimierung von Komplexität und Reaktionsgeschwindigkeit, hoher Redundanz, Selbst-Reparier- und Programmierbarkeit sowie Nicht-Ersetzbarkeit beruhen, gilt für die Prinzipien der Sensorik in der Ingenieurtechnik gerade das Gegenteil. Im Folgenden wird daher auf die Prinzipien der Strukturauslegung in den Ingenieurtechnik und einem zugehörigen Lebensdauermanagement eingegangen.

Strukturauslegung und Betriebsbeanspruchungen

Strukturauslegungen in der Ingenieurtechnik gehen von Lastannahmen aus. Diese Annahmen sind üblicherweise das Ergebnis von Erfahrungen aus der Vergangenheit gepaart mit einem entsprechenden Sicherheitsfaktor, der alle weiteren Unbekannten abdecken muss. Diese Lastannahmen sind die Grundlage der rechnerischen Bemessung des zu betrachtenden Bauteils, dessen Beanspruchungsverteilung neben den auftretenden Lasten durch seine Geometrie bestimmt wird, wobei Kerben und mehrachsige Beanspruchungszustände zusammen mit dem ausgewählten Werkstoff vielfach die entscheidenden Größen sind. Die sich daraus ergebenden maximalen Beanspruchungen werden der Beanspruchbarkeit des verwendeten Werkstoffs gegenüber gestellt. Sind die Beanspruchungen kleiner als die Beanspruchbarkeit, so ist das Bemessungsziel, zumindest vom Standpunkt er Festigkeit her, erfüllt. Ansonsten müssen die Bauteilgeometrie, der Werkstoff und/oder die Lasten so verändert werden, dass dieses Ziel erreicht wird, was immer sich unter den gegebenen Umständen machen lässt.

Vielfach treten aber auch im Leben von Bauteilstrukturen Überlasten auf, die verschiedene Ursachen haben können. Ein gängiger Fall sind Unfälle, bei denen die beschädigten Bauteile hinsichtlich ihrer Schädigung offensichtlich sind, nicht aber die Bauteile, die aufgrund Unfallbelastung überproportional beansprucht wurden und deren Schädigung erst im späteren Betriebsleben, jedoch vor der Bemessungslebensdauer offensichtlich werden. Ähnlich gelagert verhält es sich mit falscher Nutzung, wo z.B. bei Fahrzeugen irrtümlich die Nutzlast überschritten wurde. Die daraus resultierende Schädigung pflanzt sich nur langsam fort, führt allerdings dann zu einem Schaden, der weit vor Erreichen der Bemessungslebensdauer eintritt. Ein weiteres Feld ähnlicher Natur ist die Nutzungserweiterung von Ingenieurstrukturen, wie z.B. die Erhöhung der Nutzlasten auf Straßen und Brücken oder die Änderung des Missionsspektrums bei Militärflugzeugen. In all solchen Fällen wäre es gut, wenn man zumindest eine genauere Information der auftretenden Betriebslasten hätte, die dann zur genaueren Beurteilung des Schädigungszustandes herangezogen werden könnten. Mit den heutigen Methoden der FE-Rechentechnik und entsprechenden Postprozessoren der Ermüdungslebensdauervorhersage ist es möglich, Schädigungsverteilungen in Bauteilstrukturen entsprechend der real auftretenden Lasten vorherzusagen. Diese Schädigungsverteilungen können dann die Grundlage für die Auswahl möglicher einzusetzender zfP-Methoden herangezogen werden.

Structural Health Monitoring

Unter Structural Health Monitoring (SHM) wird üblicherweise die Integration von Sensorik und ggf. auch Aktorik in Bauteile und Werkstoffe verstanden, so dass Zustandsüberwachung (und damit auch zfP) zum integralen Bestandteil des Bauteils bzw. Werkstoffes wird. SHM ist weder eine neue Form der zfP, noch der Last- oder Schwingungsmessung, der Werkstoffcharakterisierung, Elektronik oder Signalverarbeitung sondern vielmehr eine laterale Integration all der Disziplinen zu einem System und einer Systematik, die zum Erhalt der Strukturintegrität beitragen. Eine Zusammenstellung der hierzu gemachten Beiträge kann u.a. in [1] gefunden werden.

Die erste Frage, die sich im Zusammenhang mit SHM stellt, ist die Frage der auftretenden Lasten und wo diese zu messen sind. Eine vermutlich noch relativ einfache Bauteil- bzw. Fahrzeugstruktur, die zudem noch einer extremen Breite an Betriebslastspektren ausgesetzt ist, ist ein Fahrradrahmen. Abb. 1 (links) zeigt schematisch einen solchen Fahrradrahmen und die dafür anzunehmenden Lastfälle, wobei auf der linken Seite die Kombination aller auftretenden Lasten, auf der rechten Seite eine Auswahl auftretender Einzellastfälle dargestellt ist. Der erste Lastfall berücksichtigt reines Rollen mit Fahrer als Nutzlast, der zweite Lastfall Treten mit voller Last auf den Pedalen (Fahrer stehend), und der dritte Lastfall akrobatische Übungen wie z.B. Sprünge.

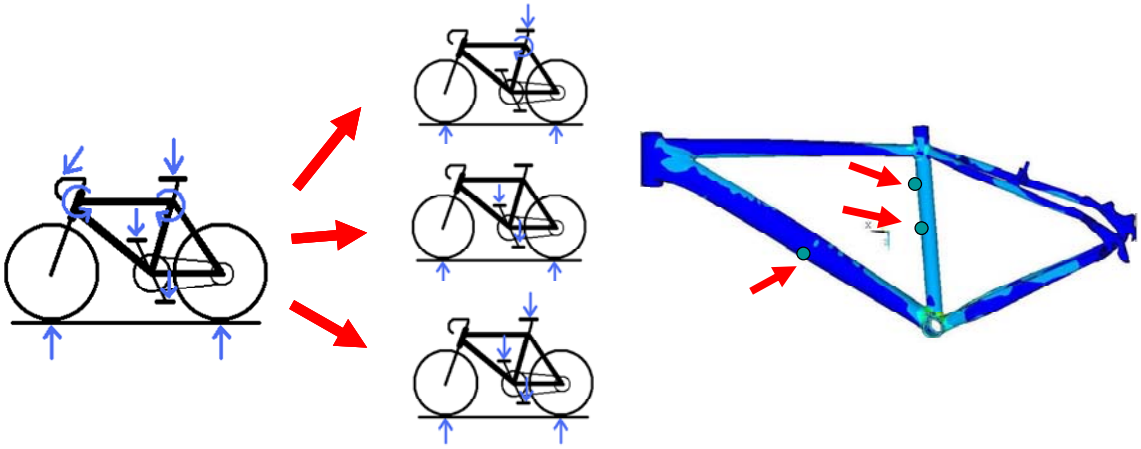

Abb. 1 Lasten auf einem Fahrradrahmen und abzuleitende Lastfälle (links) und Spannungsverteilung für ersten Lastfall (rechts)

Um geeignete Ort zur Lastmessung für z.B. den ersten Lastfall zu finden, bedarf es z.B. einer FE Analyse, anhand deren Ergebnis die Ort bestimmt werden können, die besonders sensitiv auf die auftretenden Lasten reagieren. Dies ist beispielhaft für den ersten Lastfall in Abb. 1 (rechts) gezeigt ist. Als geeigneter Ort der Lastmessung erweist sich dabei die Sitzstrebe, da relativ große Bereiche eine einheitliche Last bzw. Spannung ausweisen. Die Diagonalstrebe kann ebenfalls herangezogen werden, doch sind die Beanspruchungen dort ein wenig geringer. Am höchsten sind die Beanspruchungen im Bereich der Pedalnabe, doch sind alle Bereiche relativ klein und auch die Dicken relativ unterschiedlich, so dass eine zuverlässige Messung dort eher schwierig erscheint.

Auf der Basis dieser numerischen Analyse wurde ein Fahrradrahmen mit Dehnungsmessstreifen bestückt und diese an ein 4-kanaliges Messgerät vom Typ Match-II-4 der Firma Swift [2] angeschlossen. Aufgrund seiner geringen Masse kann das Messgerät auf dem Fahrrad mitgeführt werden. Damit ist eine Lastmessung im Betrieb möglich. Abb. 2 zeigt den entsprechenden Versuchsaufbau sowie auch Zeitmessschriebe der drei ausgewählten Sensororte.

Die Lastschriebe werden nach dem Rainflow-Lastfolgezählalgorithmus ausgewertet, wobei Schwingspiele ermittelt und entsprechend ihrer Amplitude und Mittelwert charakterisiert werden. Das Ergebnis dieser Auswertung kann in einer Matrix zusammengefasst werden, die dann das entsprechende Lastspektrum in sehr kompakter Form charakterisiert. Dieses Lastspektrum kann dann für eine Lebensdauervorhersage herangezogen werden, wie es schematisch in Abb. 3 dargestellt ist. Damit kann dann für quasi jede beliebige Lastfolge, Ort und Zeit einer zu erwartenden Schädigung vorhergesagt werden. Diese Information bestimmt dann, wann, wo und wie eine im Sinne von SHM durchzuführende Schädigungsüberwachung zum Tragen kommt.

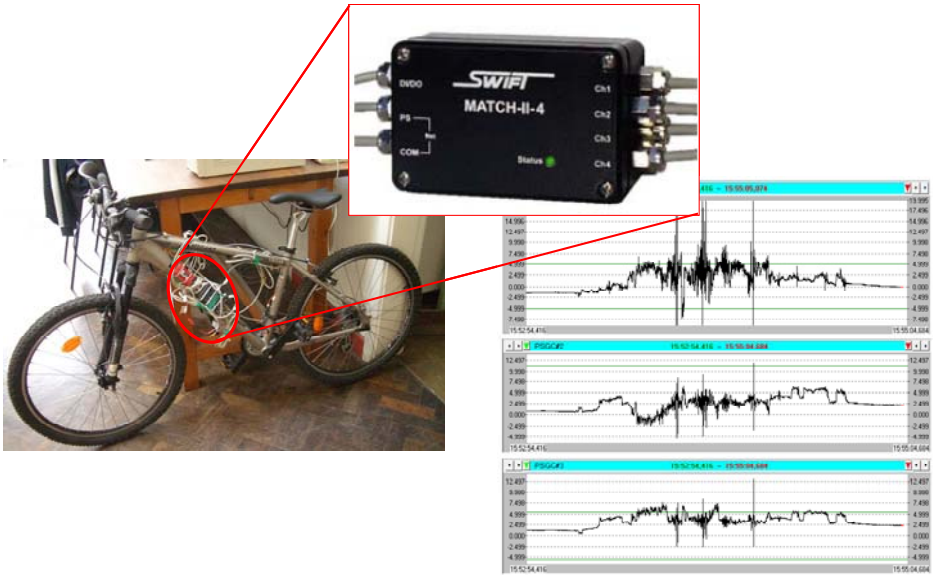

Abb. 2 Versuchsaufbau zur Lastmessung und beispielhafte Lastschriebe

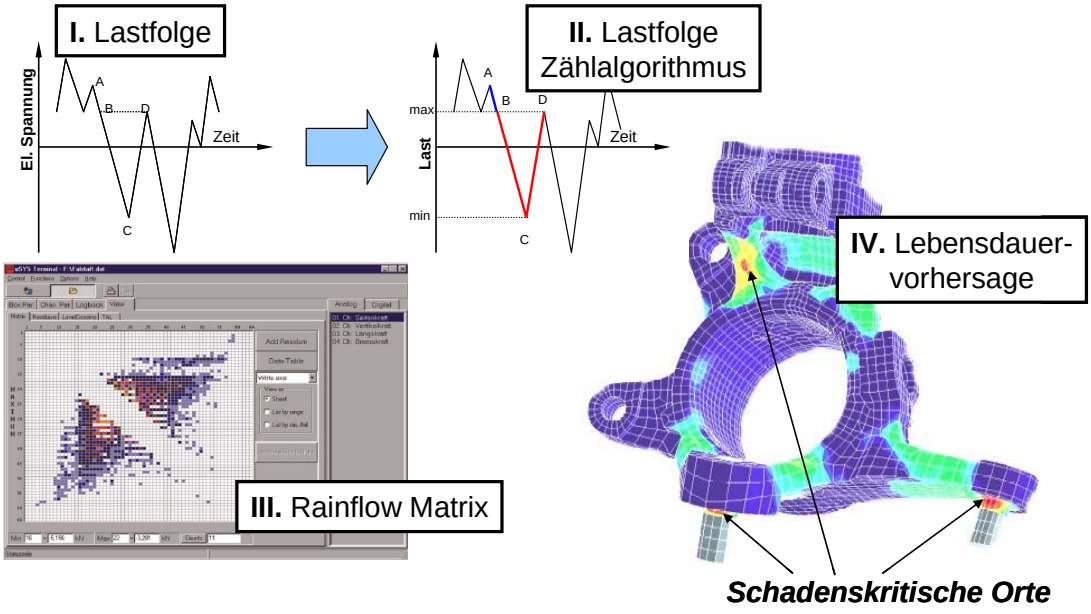

Abb. 3 Lebensdauerabschätzung zur Ermittlung schädigungskritischer Orte

Die Möglichkeiten Schädigung im Sinne von SHM zu detektieren sind mannigfaltig und beispielhaft in [1] zusammengefasst. Entscheidend ist dabei weniger, dass ein Sensor

einen bestimmten Typ von Schädigung erfassen kann, als vielmehr die Tatsache, dass eine Schädigung zuverlässig erkannt werden muss. Dies erfordert Redundanz in der Sensorik und damit ein systembezogenes Denken. SHM-Lösungen müssen daher als System konzipiert werden, wie es in Abb. 4 am Beispiel eines akustischen Schadensdetektionssystems dargestellt ist. Ein solches System muss aus einem Signalgenerator, einem Multiplexer, ggf. einem oder mehreren Verstärkern, einer Signalspeicher- und ggf. auch –auswerteeinheit sowie einer Vielzahl von Wandlern (Sensoren wie auch Aktuatoren) bestehen, die als System so redundant ausgelegt sind, dass ein Betrieb entsprechend einer vorgegebenen Ausfallwahrscheinlichkeit möglich ist. Nur auf einer solchen Basis kann SHM überhaupt realisiert werden. Aufgrund der Eigenheiten der Bauteilgeometrie, des Werkstoffes, der Belastung, der Schadenstoleranz und eventuell noch verschiedener anderer Spezifika ist davon auszugehen, dass vermutlich SHM-Systeme überwiegend singuläre Lösungen sein werden.

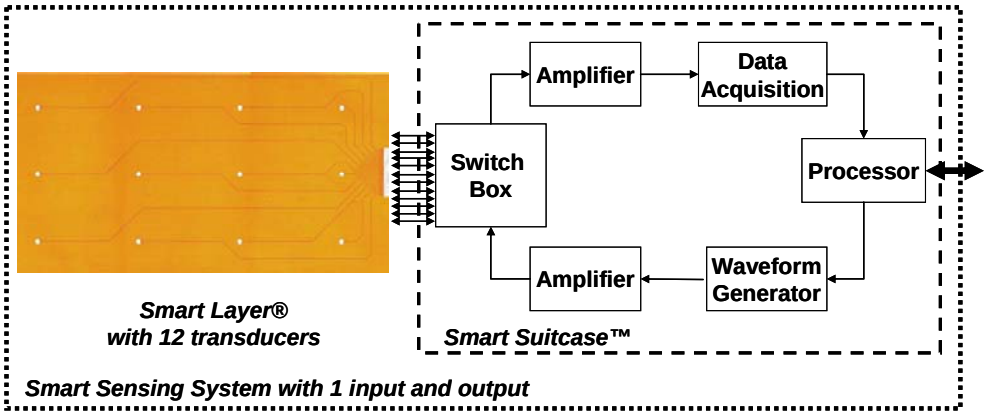

Abb. 4 Prinzip eines SHM-basierten Schadensdetektionssystems

Bestimmung von SHM Potenzialen

Die Anwendung von SHM klingt generell attraktiv. Dennoch bedarf der Einsatz von SHM prinzipieller Überlegungen, denn sein Einsatz ist mit einer Erhöhung der Systemkomplexität und schließlich auch mit Kosten verbunden. Dieser Preis muss daher durch Vorteile aufgewogen werden, die es durch eine vorherige Analyse zu detektieren gilt. Ein solcher Vorteil kann die bessere Verfügbarkeit von Geräten sein, wie dies z.B. in der Luftfahrt vielfach der Fall ist. Ein nicht unwesentlicher Anteil im Lebenszyklus eines Flugzeugs ist die Wartung und hierbei wiederum die Inspektion, die eine Verfügbarkeit des Flugzeugs ausschließt und die demzufolge in ihrem Zeitrahmen minimiert werden sollte, sofern dies nicht zu Lasten der Sicherheit und Zuverlässigkeit geht. Viele der Bauteile eines Flugzeugs müssen innerhalb bestimmter Intervalle auf Risse hin inspiziert werden. Dieser Vorgang kann zeitaufwändig sein, besonders dann, wenn der Zugang zu diesen Bauteilen mit erheblichen Aus- und Einbauaufwänden verbunden ist. Hinzu kommt, dass in den meisten Fällen nicht mehr als die Information ‚kein Fehler gefunden' erzeugt wird, eine Information, die durch ein SHM-System ggf. kostengünstiger erzeugt werden könnte. Bauteile, bei denen dieser Vorteil besonders zum Tragen kommt, sind solche, die auf dem kritischen Pfad des Wartungsprozesses liegen. Aus diesem Grund müssen Wartungsprozesse analysiert und simuliert werden, um die entsprechend auf dem kritischen Pfad liegenden Bauteile zu identifizieren. Werkzeuge zur Simulation von Wartungsprozessen gibt es verschiedene, wobei ARENA als ein hierfür vielfach genutztes Werkzeug genannt sei [3,4].

Eine prinzipielle Vorgehensweise zur Identifikation von SHM-Potenzialen in Wartungsprozessen zeigt Abb. 5 [5]. In einem ersten Schritt werden die Wartungsintervalle

über den betrachteten Lebenszyklus ermittelt. In einem zweiten Schritt wird dann der jeweilige Wartungsprozess in seine Einzelaufgaben aufgebrochen und strukturiert, so dass dann der kritische Pfad wie auch die Kostentreiber bestimmt werden können. In Schritt 3 kann dann der Wartungsprozess mit konventionellen Mitteln, d.h. Änderung der Abfolge oder zusätzlicher Einsatz von vorhandenem Personal und Gerät, optimiert werden. In Schritt 4 werden die Strukturkomponenten auf dem kritischen Pfad des Wartungsprozesses identifiziert, die für SHM-Lösungen ggf. in Betracht kommen. Diese SHM-Lösungen werden dann erarbeitet und in Schritt 5 wiederum in den Wartungsprozess eingebracht. Dabei kann sich der Verlauf des kritischen Pfades verändern bzw. können neue Strukturkomponenten auf dem kritischen Pfad auftauchen, die dann wiederum, wie bereits in Schritt 4 geschehen, entlang des kritischen Pfades zu identifizieren sind. Dieser Prozess kann prinzipiell so lange wiederholt werden, bis sich keine Strukturkomponenten mehr auf dem kritischen Pfad befinden bzw. nur noch solche, die kein ausreichendes SHM-Potenzial besitzen. Die somit verkürzte Wartungszeit kann mit den Kosten für die SHM-Lösungen verrechnet werden, woraus sich im Fall eines größeren Passagierflugzeugs leicht sechs- bis siebenstellige Beträge in Euro hinsichtlich der einzusparenden Wartungsaufwände errechnen lässt.

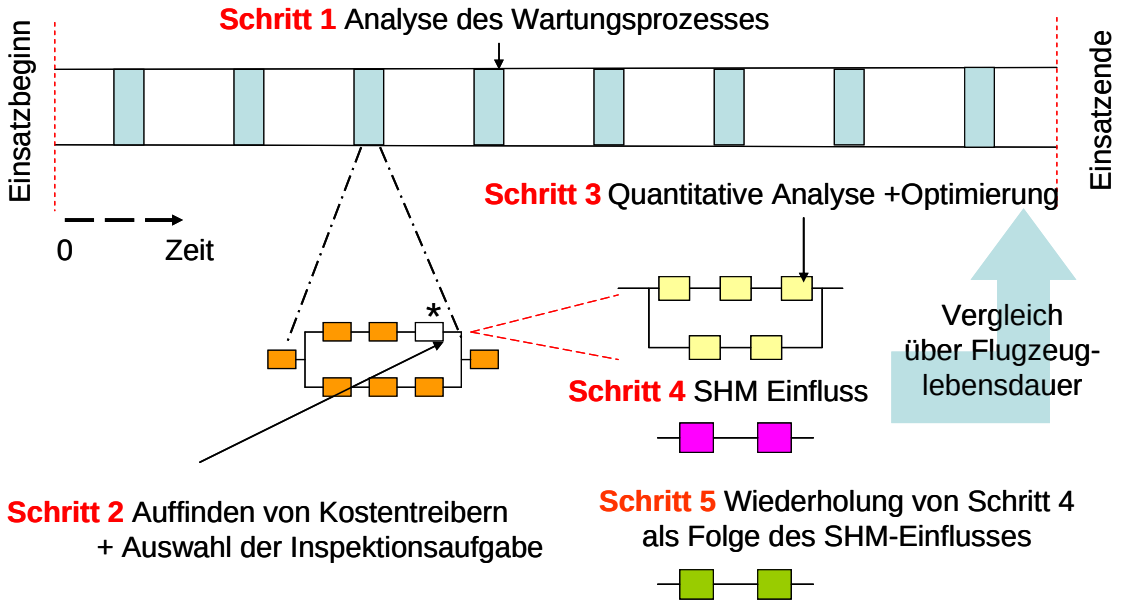

Abb. 5 Vorgehensweise zur Identifikation von SHM-Potenzialen bei Wartungsprozessen

Welche Potenziale mit SHM zu erreichen sind, soll das nachstehende Beispiel im Zusammenhang mit der Inspektion von sog. Gantries eines Transportflugzeugs zeigen. Gantries, wie in Abb. 6 (links) gezeigt, sind Träger, die überwiegend das maximale Rumpfbiegemoment über dem Flügelanschlusskasten aufnehmen. An ihren Untergurten sind zusätzlich Bleche befestigt, die den Kabinenbereich abschotten und damit Kabinendruck aufnehmen. Aufgrund der hohen und zugleich mehrachsigen Beanspruchung kann es im Verlauf der Lebensdauer zu Anrissen im Bereich von Bohrungen und an den Stegenden kommen.

Entsprechend der in Abb. 5 dargestellten Vorgehensweise wurde der Wartungsprozess analysiert, in das Simulationswerkzeug Arena eingegeben und der Prozess entsprechend o.g. Schritt 3 im Sinne einer Optimierung dadurch variiert, dass die Anzahl der Monteure und Inspektoren kontinuierlich gesteigert wurde. Das Ergebnis dieser Variationen zeigt Abb. 6 (rechts). Mit zunehmender Anzahl an eingesetztem Personal nimmt die erforderliche Wartungszeit pro Flugzeug und Lebenszyklus nichtlinear ab, wobei eine War-

tungszeit von 120 Std. für die genannte Maßnahme auch bei beliebig viel Personal nicht unterschritten wird.

Die vorgeschlagene SHM-Lösung zeigt schematisch Abb. 7. Es kann sich da z.B. um ein ultraschallbasiertes Prüfverfahren handeln, dessen Wandlerfolie einmal in den Bereich der schädigungsrelevanten Orte aufgebracht wird. Dies erfordert nur einmal das Freimachen der gesamten Peripherie der Gantries. Bei allen Folgeinspektionen erfolgt die Inspektion allein über eine Steckverbindung am Flugzeugboden. Im Vergleich zu dem zuvor genannten minimalen Wartungsaufwand von ca. 120 Std. verringert sich der für die SHM-Lösung ermittelte Wartungsaufwand auf ca. 20 Std.. Zieht man in Betracht, dass jede Betriebsstunde eines Transportflugzeugs für den Betreiber je nach Flugzeuggröße einen Wert von mehreren tausend Euro darstellt, so akkumuliert sich hier allein für einen Schadenstyp leicht eine Summe von einem guten sechsstelligen Betrag in Euro über den Lebenszyklus eines jeden Flugzeugs.

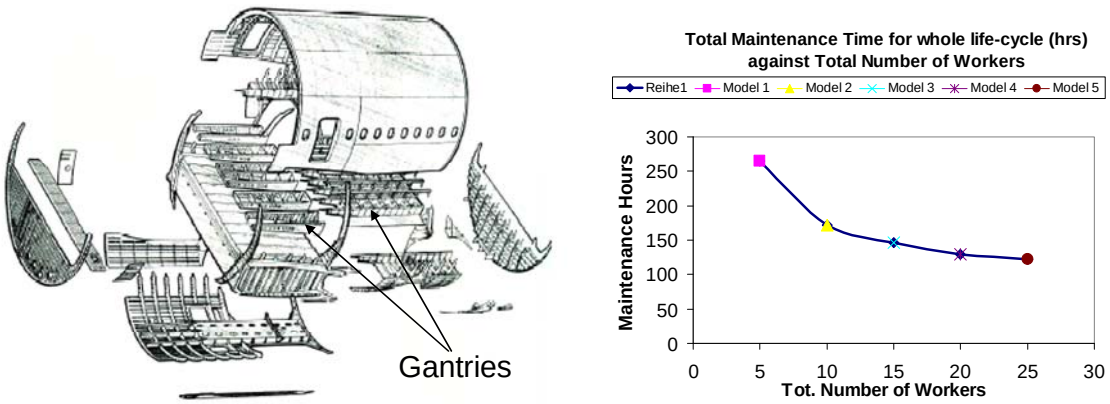

Abb. 6 Gantries in einer Flugzeugstruktur (links) und Ergebnis einer Wartungssimulation für Gantries (rechts)

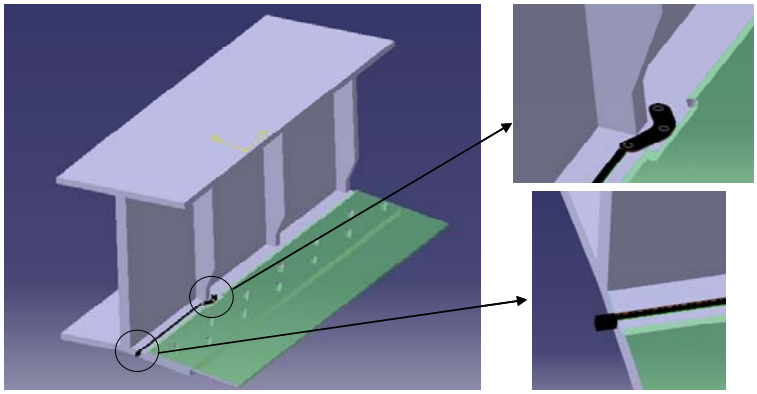

Abb. 7 Mögliche SHM-Lösung für Gantries

Zur Rolle der zerstörungsfreien Prüfung - Schlussfolgerungen

Es gibt eine zunehmende Anzahl alternder Infrastruktur, deren Integrität es mit zusätzlichem Aufwand zu überwachen gilt, wenn sich diese Überwachung lohnt. Eine interessante Option die Integrität von Infrastruktur zu überwachen besteht mit SHM. Um dies zu tun und festzustellen, ob sich der Aufwand denn auch wirklich lohnt, bedarf es aber vorab einer Analyse des Lebenszyklusprozesses des betrachteten Bauteils bzw. der Struktur, um

zu erkennen, welche Bauteile eigentlich wann und unter welchen Umständen die interessanten sind. Diese Analyse dient auch dazu, die entsprechend erforderlichen Schritte innerhalb eines Lebensdauermanagements zu erkennen und dieses entsprechend zu strukturieren. Auf dieser Basis können dann die SHM-Lösungen für das jeweils zu betrachtende Bauteil konfiguriert werden, wobei zu vermuten ist, dass es nicht ‚die SHM-Lösung' geben wird, sondern dass SHM mehr eine für jeden Bauteiltyp spezifisch konfigurierte Lösung sein wird. SHM muss daher als interdisziplinär entwickeltes System und nicht als eine Neugeburt einer speziellen Disziplin betrachtet werden. In diesem Sinne leistet zfP einen Teilbeitrag zu SHM und setzt dort an, wo Schädigungszustände zu erkennen sind. Hier kommen dann viele der klassischen zfP-Verfahren zum Tragen, wobei diese so zu Miniaturisieren sind, dass sie zum integralen Bestandteil eines Bauteils oder Werkstoffes werden können. Damit kann sich die Rolle des klassischen zfP-Prüfers wandeln. Statt wie früher Bauteile regelmäßig hinsichtlich ihrer Integrität zu prüfen und in vermutlich mehr als 99% der Fälle immer dieselbe Information ‚kein Fehler gefunden' zu generieren, sollten zfP-Prüfern zukünftig eventuell interessantere Aufgaben zukommen. Solche Aufgaben könnten das Lebensdauermanagement sein, wobei der Prüfer dann eher zulässige Schädigung im Sinne einer schadenstoleranten Auslegung der betrachteten Bauteile organisiert. Die klassischen Aufgaben des zfP-Prüfers könnten hingegen durch SHM zunehmend automatisiert werden. Bis dahin ist allerdings noch ein langer Weg, denn derzeit gibt es bei der Entwicklung von SHM-Systemen noch viel zu tun. Es beginnt damit, dass solche Systeme eigentlich nur in Ansätzen auf dem Markt käuflich zu erwerben sind. Ihr technologischer Reifegrad ist noch deutlich verbesserungswürdig, was insbesondere auch an der Zuverlässigkeit der Systeme wie auch an noch weitgehenden nicht vorhandenen Entwurfs- und Optimierungsalgorithmen und nicht zuletzt auch an der mangelnden Integrität zwischen den verschiedenen beteiligten Disziplinen liegt. Nicht zu vergessen sind dabei auch Vorgehensweisen, die den Nutzen von SHM überhaupt bestimmen lassen, denn da wo der Leidensdruck am höchsten ist besteht bekannterweise auch größte Bereitschaft, interessante Technologien weiterzuentwickeln.

Referenzen

[1] Boller C., F.-K. Chang and Y. Fujino (Editors-in-Chief), 2009: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring Vol. 1 – Vol. 5*, John Wiley & Sons, Chichester/UK

[2] www.swift-online.de (Stand Mai 2009)

[3] Kelton D W, et al., 2002: *Simulation with ARENA;* 2nd Ed., McGraw Hill, New York, USA

[4] Vigus S E, 2003: *A simulation-based analysis of the impact of in-sourcing a major process element on the Coast Guard HH-60J depot maintenance process;* MSc thesis AFIT/GAQ/ENS/03-03, Air Force Inst. of Technology, Wright-Patterson AFB, USA

[5] Boller C, H Kapoor and W T Goh, 2007: *Structural Health Monitoring Potential Determination Based on Maintenance Process Analysis;* SPIE Smart Materials and Structures Symposium, San Diego/CA, USA, SPIE Vol. 6527