



# Die Zerstörungsfreie Prüfung im Wandel – Von der Qualitätsprüfung zum Lebensdauermanagement

Gerd DOBMANN, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

**Kurzfassung.** Der Beitrag schildert den Entwicklungsweg der ZFP als Teil des Qualitätsmanagements bis hin zur Integration in Lebensdauerstrategien und zeigt den erreichten Leistungsstand auf.

## Einführung

Denken wir an die Bauwerke der Sumerer, Babylonier, Ägypter, Griechen und Römer, so zweifelt keiner, weder an der Kühnheit der architektonischen Entwürfe, noch an der Präzession und Qualität der ingenieurmäßigen Bauausführungen, die zu einem erstaunlichen und weitgehenden Erhalt der Monumente über die Jahrtausende hinweg bis in unsere Zeit geführt haben. Sie wurden nicht gepflegt, sondern im Gegenteil oftmals Jahrhunderte lang, wie z.B. der Parthenon der Akropolis, missbräuchlich genutzt und waren den Naturgewalten ausgeliefert. Die Geschichtsschreibung lehrt uns aber auch, mit wie viel finanziellem Aufwand, insbesondere aber mit wie viel Opfer an Menschen auf den Baustellen unsere Vorfahren solche Leistungen vollbringen konnten. Bevorzugt totalitäre Regime erzwangen diese Leistungen. Man erinnere sich auch daran, dass die Wirtschaft der griechischen Demokratien unter anderem florierete, weil gebärfähige Frauen und Kinder besiegt feindlicher Stadtstaaten versklavt wurden. Kriegsfähige Männer sprangen grundsätzlich über die Klinge und die Alten, nicht fähig sich selbst zu ernähren, überließ man ihrem Schicksal.

Im finsternen Mittelalter gerieten dann viele ingenieurmäßige Fähigkeiten der Vorfahren in Vergessenheit und wurden erst mit der Rückbesinnung in der Renaissance wiederentdeckt. Allein beim Kunsthandwerk, wie der Malerei, oder der Kunst der Steinmetze der Dombauschulen, man denke z.B. an gotische Kathedralen, muss man auch dem Mittelalter Innovationskraft zuschreiben. Im Gegensatz zu neuen Ländern wie den spät besiedelten USA beginnt jedoch das Bewusstsein handwerkliche Qualität fertigen zu müssen in Italien, Frankreich und Deutschland mit der Etablierung der Zünfte seit dem 12. Jahrhundert wieder Tradition zu haben. Die Zünfte gaben sich selbst ihre Qualitätsregeln und gaben sie durch wohl organisierte Ausbildung durch die Meister an die Gesellen und Lehrlinge weiter. Seit dem 14. Jahrhundert mussten, allgemein üblich, Meister ihr Meisterstück abliefern. Folgt man Meyers Konversationslexikon [1] so machte man >> die zünftige Meisterschaft von dem Nachweis einer bestimmten Qualifikation in moralischer und technischer Hinsicht << abhängig, >> Zwangs- und Bannrechte sicherten vielfach den Zünften ihr bestimmtes Arbeits- und Absatzgebiet, aber den Rechten standen auch Pflichten der Zünfte gegenüber und namentlich die Pflicht, die Ehre des Gewerbes zu wahren, das Wohl der Stadt zu fördern und für gute Leistungen zu sorgen. Zahlreiche Betriebsbeschränkungen der einzelnen Zunftgenossen verfolgten den Zweck, einerseits das

Interesse der Konsumenten an der Güte und Preiswürdigkeit der Waren voll zu befriedigen (Vorschriften über die Herstellung der Waren, Arbeits- und Warenschau, Markenzwang, Preistaxen etc.), andererseits in Durchführung des Prinzips der Gleichheit und Brüderlichkeit dem einzelnen Genossen ein standesgemäßes Einkommen und die wirtschaftliche Selbständigkeit zu sichern (Beschränkung der Zahl der Gesellen und Lehrlinge, gemeinsame Anschaffung der Rohstoffe, gemeinsame gewerbliche Anlagen, Regelung des Angebots etc.) <<. Qualität wurde im System gelebt. Dieses System, das einerseits dem Verbraucher von Waren oder Nutzer von Dienstleistungen die Qualität bei angemessenen Preisen sicherte, verhinderte jedoch andererseits mit dem Beginn der industriellen Revolution >> die Entwicklung des Großbetriebs und kapitalistischer Gewerbsunternehmungen <<. Deswegen fand die industrielle Revolution zunächst auch nicht in Mitteleuropa statt, das noch durch das Zunftwesen geprägt war, sondern in England, in dem das Bürgertum den Wandel zum Frühkapitalismus vollzog. Dieser ist gekennzeichnet von der Eroberung von Wachstumsmärkten, insbesondere in den Kolonien, und damit der Entwicklung der kostengünstigen Massenproduktion auch unter Nutzung von Innovationen wie der Dampfmaschinenkraft. Dieser frühindustrielle Kapitalismus ist aber auch ebenso berüchtigt durch die menschenverachtende Ausbeutung der menschlichen Arbeitskraft, einschließlich der Nutzung der Kinderarbeit. Der Weg von der Einzelteilfertigung zur arbeitsteiligen Massenfertigung führte aber auch, wie Karl Marx es nannte, zur Arbeitsentfremdung. Der Einzelne im Produktionsprozess hatte keine Chance mehr den Gesamtprozess zu überschauen, was ein nachlassendes Bewusstsein der Qualitätsverantwortung durch die Werkstätigen nach sich zieht. Begriffe wie Mitarbeiterzufriedenheit, die wir heute anstreben, um auch die Produktqualität zu steigern, waren nicht denkbar. Aus Beruf und Berufung im Handwerk wird Job in der Massenfertigung, aus dem gelernten Gesellen und Meister werden Handlanger, die umso billiger ihre Arbeitskraft verkaufen müssen, je geringer ihr Bildungsstand und Ausbildungsstand sind. Wie auch immer, durch den wirtschaftlichen Erfolg des Kapitalismus bedingt war der Niedergang des Zunftwesens alter Art nicht aufzuhalten

Offensichtlich wurde zu diesem Zeitpunkt in den kapitalistischen Industriegesellschaften ein zunehmender Verlust an Fertigungszuverlässigkeit und Produktqualität registriert. Es sind Anstrengungen registrierbar eine zerstörungsfreie Prüfung (ZFP) der Verbindungsnahte an Dampfkessel einzuführen. Der Grund war, dass durch den an der Zahl wachsenden Einsatz von Druckkessel bei gleichzeitig nicht zuverlässig gesicherter Qualität, die Zahl der verheerenden Versagensfälle anwuchs. Generell führte in der Folge die >> Dynamik der Arbeitsteilung zur Schaffung von Qualitätskontrollinstanzen in Organisationen, welche sich seit Anfang des 20. Jahrhunderts zu regelrechten Abteilungen mauserten. Die Massenproduktion der Industrie ließ eine 100%-ige Qualitätskontrolle nicht mehr zu und zog die Entwicklung und den Einsatz statistischer Prozesskontrollmethoden nach sich << [2]. Dabei muss festgestellt werden, dass statistische Methoden zwar erlauben Qualitätsregelkreise aufzubauen, sofern Prozessmodelle bekannt und validiert sind, der Erfolg der Regelung wirkt sich jedoch nie augenblicklich (real time online closed loop), sondern immer zeitverzögert aus. Im Massenprozess bedeutet das grundsätzlich die Erzeugung von Ausschuss. Das Ersetzen statistischer Prozessüberwachung durch echtzeitgestützte Mess- Prüf- und Regelsysteme unter Nutzung der ZFP ist daher eine generelle Strategie der heutigen Industrie, auf die noch einzugehen ist.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert wurde der Begriff und die Strategie des Total Quality Management (TQM) entwickelt, was im Deutschen, besser mit ‚umfassend‘ denn mit ‚total‘ übersetzt wird. >>Umfassendes Qualitätsmanagement (UQM) ist laut Definition der DIN ISO 8402 die auf die Mitwirkung aller ihrer Mitglieder gestützte Managementmethode einer Organisation, die Qualität in den Mittelpunkt stellt und durch

Zufriedenstellung der Kunden auf langfristigen Geschäftserfolg sowie auf Nutzen für die Mitglieder der Organisation und für die Gesellschaft zielt. Wesentlich für den Erfolg dieser Methode ist, dass die oberste Leitung überzeugend und nachhaltig führt und dass alle Mitglieder der Organisation ausgebildet und geschult sind. Der Begriff ‚Nutzen für die Gesellschaft‘ bedeutet: ‚Erfüllung der an die Organisation gestellten Forderungen der Gesellschaft‘ << [2]. TQM bedeutet die Verinnerlichung und Umsetzung der Erkenntnis, dass die im vorherigen Absatz aufgezeigten Rückkopplungsprozesse nicht nur technisch, prozessmodellbezogen verstanden werden dürfen, sondern, dass sämtliche, beteiligten Menschen, von der Unternehmensspitze bis zum Handlanger, regelnd eingebunden werden müssen. Dieses setzt auch die Beachtung ethischer Prinzipien voraus, wenn wirkliche Erfolge für die Gesellschaft erzielt werden wollen.

## Die Rolle der ZFP in dieser Strategie

### *Historisch – ZFP zur Qualitätsabsicherung sicherheitsrelevanter Komponenten*

Es wurde schon gesagt, dass die katastrophalen Unfälle mit explodierenden Dampfkesseln gegen Ende des 19. Jahrhunderts die Einführung und Entwicklung der ZFP beschleunigt haben. Historisch hat sie also Ihre Wurzeln in der Sicherheitstechnologie druckführender Komponenten, die eben nicht katastrophal versagen dürfen. Die technischen Überwachungsvereine in Deutschland und Österreich haben ihren Ursprung in den jeweiligen Dampfkesselverbänden, die Vorschriften zur Prüfung der Behälter erließen. Ziel der Prüfungen war die Absicherung der Herstellungsqualität und gesucht wurden Fehlstellen. Da einerseits kein Werkstoff und keine Verbindungsnaht fehlerfrei herzustellen ist und andererseits jedes Prüfverfahren, physikalisch bedingt, eine Nachweisgrenze besitzt, die von der Art der Fehlstelle, ihrer Größe und Orientierung abhängig ist, muss die Auslegung und Konstruktion der Komponente beide Einflüsse berücksichtigen. Die Nachweisgrenze definiert sich dabei als diejenige Größe, die in dem angezeigten Prüfsignal eine um den Faktor 2 größere Amplitude (6db) erzeugt als das größte in der Prüfsituation vorhandene Störsignal. Die Qualität der Prüfung ergibt sich aus statistischen Zuverlässigkeitsuntersuchungen. Danach ermittelt man an wohl definierten Testkörpern für jede Größe  $a$  einer Fehlstellenart in einer vorgegebenen großen Zahl (z.B. 100) von Prüfversuchen den %-Anteil POD( $a$ ) von 100 bei dem der Nachweis von  $a$  gelingt, so erhält man die Kurve für die Nachweiswahrscheinlichkeit als Funktion von  $a$  (POD=probability of detection). Führt man das Experiment für jedes  $a$  mehrmals durch, so wird nur zufällig der gleiche POD-Wert gefunden werden. Allgemein ergibt sich eine Verteilung von POD-Werten für jedes  $a$  mit einem Mittelwert und einer Standardabweichung.

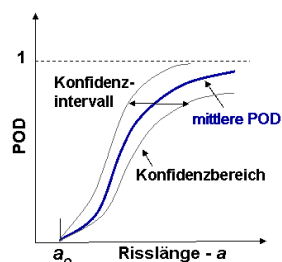


Abbildung 1: Mittlere Fehlstellen-Nachweiswahrscheinlichkeit POD und Konfidenzintervall für z.B. den Nachweis einer Risslänge  $a$

Unter Nutzung bekannter Tabellen lassen sich damit für die mittlere POD-Kurve auch zwei Grenzkurven berechnen, die durch die obere und untere 95%-Fraktile gegeben sind. Abbildung 1 skizziert die Situation. Der 95%-Konfidenzbereich ist dabei so definiert, dass bei der Messung einer weiteren Stichprobe der damit zu findende neue Mittelwert mit 95%-tiger Wahrscheinlichkeit in den Konfidenzintervall liegt. Als Charakteristikum für die Zuverlässigkeit des ZFP-Verfahrens wird oftmals die Fehlstellengröße  $a_{90/95}$  herangezogen. Sie ist die Größe, die mit 90% POD nachgewiesen werden kann und im 95%-tigen Konfidenzintervall (Abbildung 1) liegt. Es wird aus den Ausführungen klar, dass die Ermittlung der POD ein sehr aufwendiger und damit kostspieliger Prozess ist und daher allein im sicherheitsrelevanten Anwendungsbereich Rechtfertigung findet. Ebenso wie statistisch die POD (a) bestimmt werden kann, lässt sich die ‚probability of failure‘ (POF(a)) in Experimenten an wohl definierten Proben bestimmen, die man mit den Spannungen belastet, wie sie beim Betrieb auftreten. Eine optimale Auswahl des ZFP-Verfahrens hat man dann getroffen, wenn die POD (a)-Kurve grundsätzlich oberhalb und links von der POF(a)-Kurve liegt und schneller gegen den Wert 1 strebt. Der Abstand beider Kurven charakterisiert die Sicherheitsreserve auf die man sich in der Praxis stützen kann, er sollte möglichst groß sein.

Die Anforderungen der Druckbehälterverordnung, heute, europäisch standardisiert, Druckgeräterichtlinie genannt, hat die Innovationsfähigkeit der ZFP herausgefordert und bestimmt. Waren es Anfangs des 20. Jahrhunderts die Druckbehälter der Chemischen Industrie, welche die Entwicklungen trieben, kam nach dem 2. Weltkrieg die friedliche Nutzung der Kernenergie als Treiber hinzu, wobei durch das Konzept der Basissicherheit [3,4] bei den Primärkreislaufkomponenten der Beweis des Bruchausschlusses erbracht wird, das heißt, dass das Leck-vor-Bruch-Kriterium eingehalten wird. In anderen Worten ausgedrückt bedeutet das, dass ein unterstellter Umfangsriss in einem Reaktordruckbehälter deutscher Bauart mit 1,5 m Länge, von halbelliptischem Querschnitt und einer maximalen Tiefe von  $2/3$  der Wandstärke unter Betriebslasten nur zu einer Leckage führt. Dagegen weist die nach Regelwerk eingesetzte Ultraschallprüfung flächige Reflektoren mit Kreisscheibendurchmessern von  $> 3\text{mm}$  nach. Erreicht wird die Basissicherheit vorrangig durch die Werkstoffauswahl unter Nutzung hochzäher Stähle und durch die Qualitätssicherung bei der Fertigung (siehe Abbildung 2). Die ZFP hat dabei primär absichernden Charakter, über die Lebensdauer der Komponenten hinweg wird sie bei der automatisierten, wiederkehrenden Prüfung nach definierten Betriebsintervallen eingesetzt.

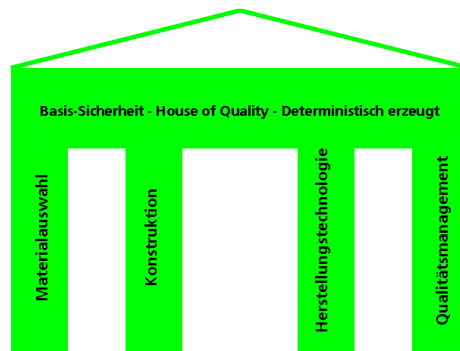


Abbildung 2: Das ‚house of quality‘ des Basissicherheitskonzeptes der deutschen Kerntechnik

Die Luft- und Raumfahrt und die schienengebundene Hochgeschwindigkeits-Verkehrstechnik sind als Treiber für ZFP-Entwicklungen hinzugekommen. Dabei wird insbesondere bei der Betrachtung des ZFP-Einsatzes in der Luftfahrt deutlich, wie dominant der Einfluss des Designkonzeptes der Komponenten ist. Moderne Flugzeuge werden ‚schadenstolerant‘ [5] ausgelegt. Dieses Designkonzept ist ohne den Einsatz der

ZFP bei der Wartung der Flugzeuge nicht denkbar. Einerseits stützt sich das Konzept auf Redundanz bei der Konstruktion der die Struktur tragenden Teile, mögliche Lastpfade werden mehrfach abgesichert, andererseits wird die ZFP-Methode, die später an den Flugzeuge eingesetzt werden wird, schon während der Design- und Erprobungsphase der Einzelkomponenten, z.B. dem Flügel, bezüglich ihrer Zuverlässigkeit getestet. Erprobung meint dabei grundsätzlich die Erprobung im Ermüdungstest. Die Komponente wird im Experiment 1:1 denjenigen Lastwechsel unterworfen, welche das Flugzeug später während seiner Designlebenszeit erleben wird. Es wird gelernt, welche Ermüdungsfehler, i. a. Risse, bei welcher Lastwechselzahl an welchen bestimmten Positionen entstehen und mit welcher Geschwindigkeit sie wachsen. Die ZFP zu ihrem Nachweis wird entwickelt und die schon oben definierte Fehlstellengröße  $a_{90/95}$  wird ermittelt. Abbildung 3 zeigt einen Überblick über die Struktur des Schadenstoleranzkonzeptes.

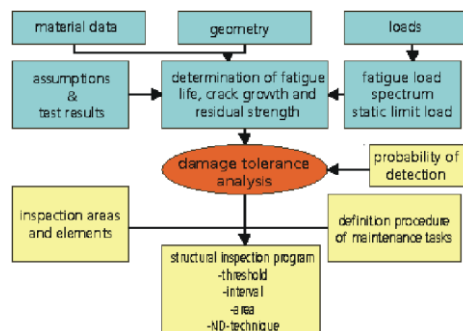


Abbildung 3: Die Rolle der ZFP im Schadenstoleranzkonzept in der Luftfahrt seit 1978

Darüber hinaus wird die ZFP zunehmend fortentwickelt, um dem Entwickler industrieller Produkte zu sehr frühen Zeitpunkten seiner Entwicklung Einblick in den Stand seiner Technik zu geben. Hier sind natürlich auch analytische Methoden bis hin zur  $\mu\text{m}$  und  $\text{nm}$  ZFP gefordert. Insgesamt sieht sich die ZFP eingebunden in den Qualitätskreis, wie ihn der Standard ISO 55350 definiert (Abbildung 4). Blau sind dabei die Qualitätselemente (QE) gekennzeichnet in denen heute schon die ZFP eingesetzt wird und in rot sind die QE markiert, denen weltweit im nächsten Jahrzehnt die größten Zuwächse für den ZFP-Einsatz zugeschrieben werden [6].

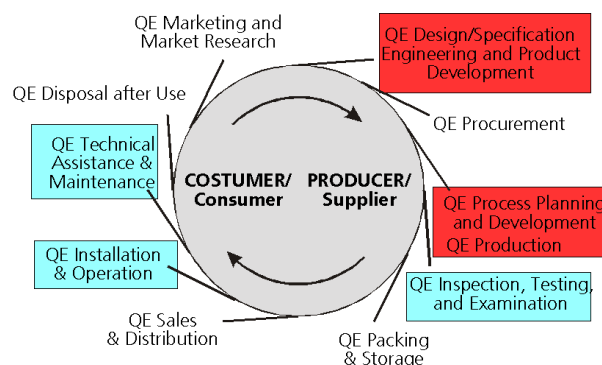


Abbildung 4: Qualitätskreis und Produktlebenszyklus nach ISO 55350 Teil 11

Dabei wird deutlich, dass sich das Qualitätsmanagement als kontinuierliche Aufgabe der Qualitätsverbesserung versteht, die das Leben einer Komponente vom Beginn des Lebens bis zu ihrem Ende verfolgt, überwacht und, nach Möglichkeit, steuert. Denkt man auch hier beispielsweise an die Kerntechnik, so ist offensichtlich dass auch die letzte Phase des Lebens, der Rückbau der Kraftwerke sicher und für die Umwelt schonend vollzogen werden muss. Eine Durchführung des Rückbaus ohne Qualitätsmanagement und damit auch ZFP ist nicht denkbar.

Es stellt sich die Frage, welche Rolle generell die ZFP beim Lebensdauermanagement spielt, bzw. noch spielen kann?

*Neue Rolle der ZFP bei der on-line Überwachung, health monitoring und structural health monitoring*

Prozessüberwachung durch Sensorik ist, wenn es um Parameter geht wie Druck, Temperatur Materialdurchfluss, Geschwindigkeit, etc, in der prozessorientierten Industrie wie z.B. der Metallerzeugenden Industrie oder der Lebensmittelindustrie üblich [7, 8]. Dass man das Leben einer Komponente als Prozess begreift und ZFP-Sensorik einsetzt, um die verschiedenen Phasen des Lebens zu verfolgen, insbesondere um Alterungsphänomene frühzeitig zu entdecken und Gegenmaßnahmen, also die Lebensdauer verlängernde Maßnahmen zu ergreifen ist in einfacher Art in der chemischen und petrochemischen Industrie z.B. zur Korrosionsüberwachung durch wiederkehrende Ultraschall-Wanddickenmessung an Rohrleitungen ebenso seit langem eine eingeführte Strategie. Dass man jedoch eine on-line Überwachung von Komponenten und Anlagen betreiben will wird erst unter zwei Randbedingungen machbar. Zum einen setzt die Strategie voraus, dass solche Sensoren kostengünstig hergestellt und betrieben werden können und zum anderen müssen diese Sensoren zuverlässig und kontinuierlich über Jahrzehnte ihren Dienst tun.

Die deutsche Kerntechnik ist der Vorreiter im Alterungsmanagement [9]. So werden, weltweit einmalig, in deutschen Druckwasseranlagen die Dampferzeugerstützen auf thermomechanische Alterung durch Ermüdung überwacht. Die Sensoren sind hier Thermolemente, welche die Temperaturverteilung in Umfangsrichtung erfassen. Aus ihr kann mit entsprechenden Modellen die Verformung und Ovalisierung des Rohres als Lastwechsel berechnet werden und die akkumulierte Dehnung über Jahre hinweg aufintegriert werden. Projekte, bei denen erstmals die Entwicklung von ZFP-Sensoren für das Alterungsmanagement von Kraftwerksanlagen angegangen wird, um eine Früherkennung von Ermüdung und Strahlenbelastung zu leisten, sind in Institut des Autors in Bearbeitung.

Die Entwicklung der Sensorik, vor allem durch die Integration von hochintegrierter Rechenleistung und Mikroelektronik lässt die Erfüllung der oben genannten ersten Forderung, preiswerte on-line Sensoren zu entwickeln, realistisch erscheinen [10]. So existieren auch erste piezoelektrische Fasersensoren (siehe Abbildung 5), die in Faserverbundmaterialien integriert werden können und die sowohl zur passiven Schallemissionsüberwachung eingesetzt werden können als auch zur aktiven Prüfung durch Erzeugen von Plattenwellenmoden [11].

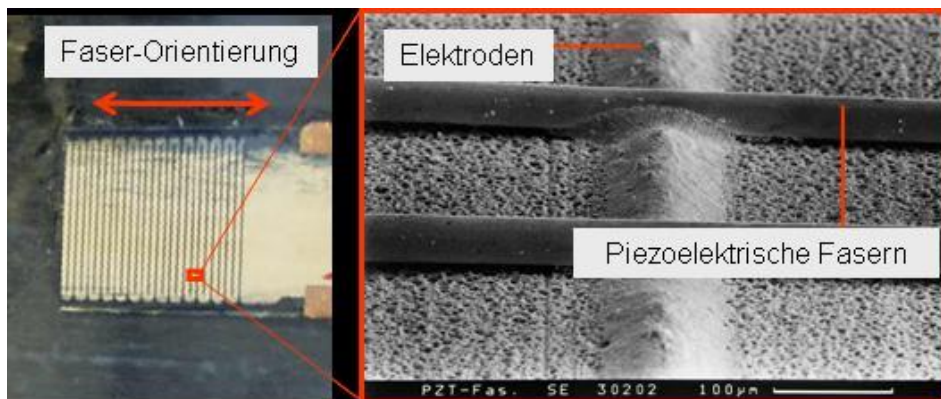


Abbildung 5: Piezoelektrische Fasersensoren zur Integration in Faserverbundwerkstoffe wie z.B. Rotoren von Windenergieanlagen

In Faserverbundbauteile wie z.B. den Rotoren von Windenergieanlagen integriert werden Sie eine on-line Lebendauerüberwachung ermöglichen und damit eine ZFP-Früherkennung von Schäden die durch die Anwendung konventioneller manueller ZFP durch den Prüfer kaum bezahlbar ist.

Die Luftfahrtindustrie verfolgt weltweit das Konzept des ‚structural health monitoring‘ (SHM). Das in die Struktur integrierte ZFP-Sensoriknetzwerk soll dabei, wie in Abbildung 6 gezeigt [12], ähnlich dem zentralen Nervensystem des Menschen Krankheitssymptome in der Struktur an ein Hirn (Computer) melden, das dann eine Schadensanalyse einleitet und, wenn notwendig, Instandhaltungsmaßnahmen initiiert. Die Vorteile, welche sich die Flugzeugkonstrukteure von SHM erwarten macht Abbildung 7 deutlich. Man glaubt entweder, bei gleicher Maintenancehäufigkeit, wie heute nach damage tolerantem Design, höhere Spannungen zulassen zu können, also leichter zu bauen, oder, bei gleichen Spannungsniveau, wie nach heutigem Design, die Maintenancehäufigkeit zu verringern, also Prüfkosten über die Lebenszeit hinweg zu sparen und damit wirtschaftlicher zu fliegen.

Grundsätzlich muss jedoch festgehalten werden, dass SHM heute noch ein Forschungsthema ist und das Ziel, eine Zuverlässigkeit der Sensoren über 40 Jahre Lebensdauer zu gewährleisten, als ein Killer-Kriterium angesehen werden muss, wenn es nicht erreicht werden kann. Da die Luftfahrt konservativ ist, erprobt sie Sensoren zunächst bei Ermüdungsversuchen an Komponenten auf der Erde. In einen zweiten Schritt will sie mit Sensoren, die sich im ersten Schritt als leistungsfähig erwiesen haben, an Flugzeugen der heutigen Flotte, dort wo bekannt ist, dass Ermüdungsschäden entstehen, lokal so genannte Hotspots überwachen. Erst im letzten Schritt will man die so ermittelten zuverlässigen Sensoren in die Struktur integrieren.

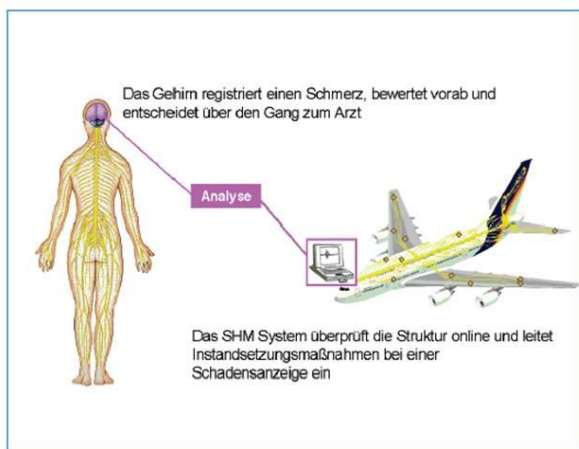


Abbildung 6: SHM Sensornetzwerk als zentrales Nervensystem in der Struktur [12]

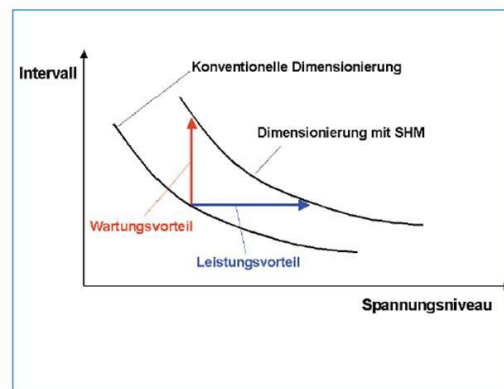


Abbildung 7: Die Vorteile von SHM [12]

### Fazit und Ausblick für ZFP-Bauanwendungen

Die Zerstörungsfreie Prüfung allgemein geht konsequent den Weg sich in Strategien des TQM zu integrieren und ihre Fähigkeiten in sämtlichen Phasen des Lebens eines Produktes einzubringen, wenn die Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit während der Nutzungsphase es erforderlich machen. Bauteilüberwachung durch Sensoren und Sensornetzwerke scheinen durch die mikroelektronische Integration der Sensoren mittelfristig möglich zu werden. Eine Zuverlässigkeit der Sensoren über lange Lebensdauern zu erzielen ist noch ein Forschungsziel.

Im Bauwesen haben Unfallereignisse der letzten Zeit deutlich gemacht, dass die Bauindustrie, aber auch die Bauherrn und Betreiber der Bauwerke gemeinsam hier noch entscheidende Schritte tun müssen um Sicherheiten beim Betreiben der Bauwerke zu erreichen, wie sie bei anderen sicherheitsrelevanten Industrieanwendungen schon erreicht werden. Sicherlich stehen hier die Sicherheit und die Lebensdauer bei Brückenbauwerken im Straßen- und Eisenbahnverkehr im Fokus des öffentlichen Interesses. Bei einer erwarteten Lebenszeit von bis zu 80 Jahren kommen auf den Betreiber enorme Kosten zu, die durch den Steuerzahler allein nicht mehr verkraftet werden können. Finanzierungsmodelle nach dem Prinzip der Brücken- und Straßenmaut müssen denkbar werden. Dann sollten sich auch private Investoren finden, die nach dem Prinzip der Mehrwertdienste das Lebensdauermanagement für diese Bauwerke in Verantwortung übernehmen. Partnerschaften zwischen Institutionen der öffentlichen Hand mit gesetzlichem Auftrag und privatem Unternehmertum sind organisierbar.

## Referenzen

- [1] Autorenkollektiv, Meyers Konversationslexikon, Band 16, Verlag des Bibliographischen Instituts, Leipzig und Wien, Vierte Auflage, 1885-1892, Seite 0933 folgende.
- [2] Lauen, G., Buschgasse 22, 50321 Brühl; Qualitätmanagement und Ethik; 13.04.2000; <http://www.fernuni-hagen.de/PRPH/lauvme.html>.
- [3] Kußmaul, K.; German Basis Safety Concept Rules and Possibility of Catastrophic Failure. Nuclear Engineering International 12 (1984), pp. 41/46.
- [4] Kußmaul, K., Blind, D.; Basis Safety - A Challenge to Nuclear Technology, IAEA Spec. Meeting, Madrid, March 5-8, 1979. Edited in: Trends in Reactor Pressure Vessel and Circuit Development, by R.W. Nichols, Appl. Science Pub. Ltd., Barking Essex, England (1979).
- [5] Schmidt H.J., Schmidt-Brandecker B., Tober G.: Design of modern aircraft structure and the role of NDI, 7<sup>th</sup> ECNDT, Proceedings of the European Conference on Non-destructive Testing, May 26 - 29, 1998, Copenhagen, Denmark.
- [6] Frost & Sullivan; World Non-destructive Test Equipment Markets, published June 3, 2004.
- [7] Dobmann, G.; Sensoren in der zerstörungsfreien Prüfung Miniaturisierung und Systemintegration zur Erschließung neuer Fähigkeiten, In: Sensoren und Mess-Systeme 2002, Proc. 11. ITG/GMA-Fachtagung, VDE-Verlag, Berlin, 2002, p. 21.
- [8] Dobmann, G.; Sensoren in der zerstörungsfreien Prüfung; Sensors 2007, Wiley VCH Verlag, Weinheim, p 36-39.
- [9] Erve, M.; Vortrag im Tagungsband zur 9. Werkstofftagung: Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften von Werkstoffen -Heute und Morgen", TU Graz, am 19.11.2004. Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von o.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Horst Cerjak, Graz; Verlag TU Graz, 2004, (ISBN 3-902465-08-5) (5./693) (2004).
- [10] Kröning, M., et al.; Progress in NDT system engineering through sensor physics and integrated efficient computing; Pan-American Conference for Non-destructive Inspection, IV; 22-26 October 2007 Buenos Aires, p 70.
- [11] Allgemeine Institutspräsentation des IZFP 2007.
- [12] Klenner, J.; Airbus Deutschland, Bremen; Vortrag auf der WING Eröffnungsveranstaltung des BMBF, Weimar, 2003, Tagungsband.