

Structural Health Monitoring (Deutsch)

Sebastian Lotz, Sommersemester 2014

English translation

Structural Health Monitoring (SHM) hat das Ziel eine Diagnose über den momentanen Zustand einer Struktur, die aus verschiedenen Komponenten und Materialien besteht, abzuliefern. Strukturen verändern sich stetig durch natürliche Alterungsprozesse, Umwelteinflüsse und auch durch unvorhersehbare Ereignisse wie z.B. Erdbeben oder Windböen. *SHM* Methoden stellen den Prozess der Implementierung von Strategien und Techniken zur Schadensdetektion und Schadenscharakterisierung, für die Infrastruktur der Luft- und Raumfahrt, des Bauwesens sowie des Maschinenbaus, dar. ^[1] Ingenieure und Materialwissenschaftler forschen speziell in den letzten drei Jahrzehnten mehr und mehr an Techniken zur Detektion von Schädigungen, da existierende Systeme wie beispielsweise Flugzeuge, Brücken und Gebäude sich immer mehr ihrem vorhergesehenen Auslegungsalter nähern. Aus dem Grund, dass viele dieser Systeme nicht wirtschaftlich ersetzt werden können, etablieren sich Methoden zur Schadensdetektion, um somit den sicheren Betrieb auch über die konstruktiv festgelegte Lebenszeit hinaus zu ermöglichen. Regelmäßig erfolgen dynamische Antwortmessungen, um den Zustand der Struktur oder des mechanischen Systems zu überwachen. Der Momentanzustand kann durch die Extrahierung von schadenssensitiven Eigenschaften dieser Messdaten mit anschließender statistischer Analyse bestimmt werden. Langzeitüberwachungen erfolgen durch periodische Anwendung des zuvor beschriebenen Prozesses um zu gewährleisten, dass die Struktur ihre beabsichtigte Aufgabe weiterhin ausführen kann. Dies ist wichtig, da nahezu jedes System durch seine operationelle Umwelt unvermeidlich altert und dadurch seine Eigenschaften verschlechtert werden. *SHM* Methoden werden verwendet, um in Echtzeit zuverlässige Auskunft über die Funktion und Zustand der Struktur zu liefern. ^[2]

- 1 [Einleitung](#)
- 2 [Wie Ingenieure und Wissenschaftler Schaden analysieren](#)
- 3 [Definition von Structural Health Monitoring](#)
- 4 [Statistical Pattern Recognition Paradigm für SHM](#)
 - 4.1 [Operational Evaluation](#)
 - 4.2 [Data Acquisition](#)
 - 4.3 [Feature Extraction](#)
 - 4.4 [Statistical model development for feature discrimination](#)
- 5 [Vergleich von lokaler zu globaler Schadenserkenkung](#)
- 6 [Fundamentale Axiome des SHM](#)
- 7 [Komponenten des SHM](#)
- 8 [Beispiele der Anwendung von SHM Methoden](#)
- 9 [Literatur](#)
 - 9.1 [Bücher](#)
 - 9.2 [Externe Links](#)
 - 9.3 [Conferences](#)
 - 9.4 [Journals](#)

Einleitung

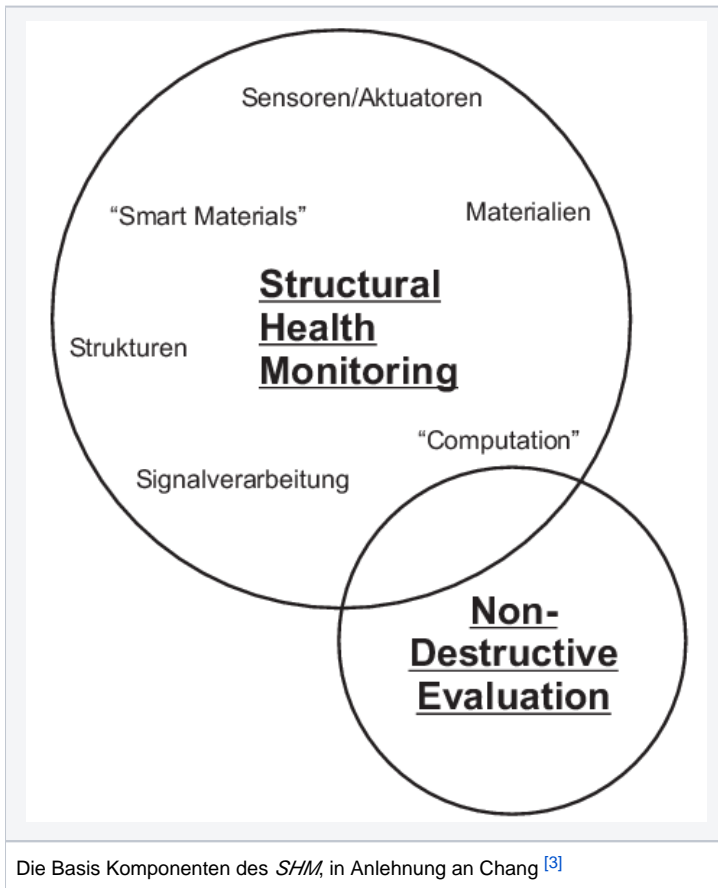
Die ersten Anwendungen des *SHM* sind bis in das 18. Jahrhundert zurückzuführen: Damals haben die sogenannten „Wheel-Tapper“ mit einem Hammer die Räder der Eisenbahnen untersucht, um Risse in diesen zu erkennen. Allerdings ist die Forschung und Entwicklung von Monitoring-Methoden erst in den letzten 30 Jahren signifikant angestiegen. *SHM* Techniken zielen darauf ab, bestehende, eher qualitative Methoden, durch sensitivere, quantifizierbare Methoden zur Schadenserkenkung zu ersetzen. Langsam beginnt *SHM* sich in der Praxis zu etablieren und lässt sich immer mehr auf eine Vielzahl reale, strukturelle und mechanische Systeme anwenden. ^[2]

Dazu gehören (wie von Balageas ^[1] beschrieben) z.B. schwingungsbasierte Methoden sowie die Implementierung von sog. „Smart Materials“ wie beispielsweise piezoelektrische Sensoren (PZT) und faseroptische Sensoren, die zur Dauerüberwachung oder Anregung von Strukturen dienen. Außerdem werden Ansätze von elektromagnetischen Wellen oder das Ausnutzen der Änderung des elektrischen Widerstandes von Systemen zur Schadensdetektion in der praktischen Anwendung beschrieben. Während der Evolution auf dem Forschungsgebiet der Schadensdetektion haben sich einige Teilbereiche herauskristallisiert, die routinemäßig in der Praxis angewendet werden. Die interdisziplinäre Natur des *SHM* umfasst folgende Teilbereiche:

- Condition Monitoring (CM) (deutsch: Zustandsüberwachung)
- Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP, Engl.: Non-Destructive Evaluation (NDE) oder auch Non-Destructive Testing (NDT) genannt)
- Health and Usage Monitoring Systems (HUMS)

- Statistical Process Control (SPC)(deutsch: statistische Prozesslenkung)
- Damage Prognosis (DP) (Schadensprognose)

SHM ist eine Weiterentwicklung der ZfP und kann folgendermaßen verknüpft werden: [3]



Speziell hervorzuheben sind die Anwendungen des „Condition Monitoring“. Diese Methoden haben den Übergang von der Theorie zur praktischen Anwendung im Bereich der rotierenden Maschinen schon geschafft. Komplexe Systeme wie Gebäude, Luft- und Raumfahrtstrukturen, Brücken, etc. können mit *SHM* Methoden teilweise aber noch nicht vollständig als „System“ überwacht werden. [2]

Wie Ingenieure und Wissenschaftler Schaden analysieren

Die Erforschung von Schädigungen in Materialien werden primär von Materialwissenschaftlern und Ingenieuren behandelt. Ansätze zur Lösung der Problemstellung bieten die folgenden Fragenstellungen:

1. Was verursacht den Schaden/die Schädigung?
2. Durch welche Maßnahmen können Schädigungen vorgebeugt werden?
3. Liegt ein Schaden/eine Schädigung vor?
4. Wie schnell wird sich die Schädigung weiter ausbreiten und einen kritischen Level erreichen?
5. Wie können die Effekte von Schäden abgeschwächt werden?

Ingenieure und Materialwissenschaftler werden diese Fragen aus unterschiedlichen Sichtweisen beantworten. Der Fokus im *SHM* liegt auf den letzten beiden Fragen und unterscheidet sich für Materialwissenschaftler und Ingenieure vor allem in der Größenordnung der Schädigung. [2] Materialwissenschaftler untersuchen die mikroskopische Schadensentstehung, bzw. Schadensausbreitung (z.B. Rissausbreitung an den Korngrenzen, uva.) des Materials, während bei Ingenieuren die Wartung im Vordergrund steht, um den Betrieb z.B. bei Überlastung einzuschränken und damit den Schaden abzuschwächen. Schaden wird definiert als beabsichtigte oder unbeabsichtigte Änderungen des Materials und/oder geometrischen Eigenschaften von strukturellen und mechanischen Systemen, eingeschlossen der Änderungen von Randbedingungen und Systemkonnektivität, welche die momentane oder zukünftige Performance dieser Systeme nachteilig beeinflussen. [2]

Definition von Structural Health Monitoring

SHM definiert den Prozess der Implementierung von Strategien und Techniken zur Schadensdetektion in die Infrastruktur von Luft- und Raumfahrt sowie des Maschinenbaus. Dieser Prozess beinhaltet:

- Die zeitliche Beobachtung eines Systems, welches periodisch die dynamischen Antworten eines Arrays von Sensoren misst,
- das Extrahieren von schadenssensitiven Merkmalen von diesen Messungen und
- eine statistische Analyse dieser Merkmale wird durchgeführt, um den derzeitigen Zustand des Systems zu bestimmen.

Existierende Methoden basieren zum einen auf mikroskopischer Basis, die ein grundlegendes Verständnis verschiedener Moden des Materialversagens entwickeln. Der makroskopische Schadenslevel der Materialien /Komponenten wird z.B. durch ZfP oder wellenbasierte *SHM* Methoden untersucht. Untersuchungen des gesamten Systems erfolgen direkt durch Verfahren wie CM, HUMS und viele weitere. Desweiteren werden Methoden zur Schadensvorhersage und Restlebensdauer von Systemen entwickelt, die zusätzlich zum *SHM* angewendet werden. [2]

Statistical Pattern Recognition Paradigm für SHM

Damit ein Schaden eindeutig als solcher definiert werden kann, muss der Systemzustand zu verschiedenen Zeitpunkten verglichen werden. Ein Referenzzustand, idealerweise der ungeschädigte Zustand, wird mit dem Momentanzustand verglichen um die Änderung des Systems zu beobachten. Betrachtet man z.B ein eingestürztes Gebäude ist dies erstmal ein geschädigter Zustand, obwohl zu dem initialen Zustand des Gebäudes keine genauen Informationen vorliegen. [2] Jedoch werden automatisch Erfahrungen aufgerufen, die das rationale Denken aktivieren und sagen, dass das Gebäude eindeutig geschädigt ist. Auf das *SHM* bezogen, kann „Wissen“ als Daten interpretiert und „Erfahrungen“ mit „lernen“ (Engl. „*learning*“) assoziiert werden. Diese natürliche Art der Schadensdetektion kann durch verschiedene mathematische Methoden mehr oder weniger exakt beschrieben werden. Für die Anwendung von *SHM* wird die statistische Art der Mustererkennung als am naheliegendsten gesehen und unter dem Begriff des „*statistical pattern recognition*“ (SPR) festgehalten. Das Konzept des „Lernens“ mit „Trainingsdaten“ wird mit Hilfe des SPR ausgeführt. Das mathematische Rahmenkonzept für diese Methode liefert das sog. „*machine learning*“ von Cherkassky und Mulier. [4] Das SPR wird anhand folgender Punkte definiert:

1. Operational Evaluation (deutsch: Betriebsdatenauswertung)
2. Data Acquisition (deutsch: Datenerfassung)
3. Feature Extraction
4. Statistical Model Development for Feature Discrimination

Die Vorgehensweise und Beschreibung der SPR wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Operational Evaluation

Der Prozess der *Operational Evaluation* (deutsch: Betriebsdatenauswertung) soll Antworten bezüglich der Implementation von Schadensidentifizierungen liefern. Grundlegende Fragen werden für diese Untersuchungen herangezogen:

1. Was sind Gründe für Sicherheit und/oder Wirtschaftlichkeit für die Anwendung von *Structural Health Monitoring*?
2. Wie ist „Schaden“ für das zu untersuchende System definiert und (für evtl. unterschiedliche Schadensfälle) welche Fälle sind am kritischsten?
3. Was sind betriebsbedingte und umgebungsbedingte Zustände, in denen das überwachte System arbeitet?
4. Wo liegen die Grenzen der Datenbeschaffung während des Betriebes des Systems/der Struktur?

Dieser erste Schritt setzt Grenzen bezüglich Abschnitte der Struktur, die überwacht werden sollen und welche Methoden anzuwenden sind. Ideal wäre es schadenssensitive Features der Struktur im inertialen Zustand zu determinieren. Durch eine kontinuierliche Auswertung dieser Daten ist es dann schnell möglich eine Schädigung frühzeitig zu erkennen. [2] Weitere Informationen zu der Vorgehensweise und Beantwortung der Fragen findet man in Farrar. [2]

Data Acquisition

Data Acquisition (deutsch: Datenerfassung) umschließt die Auswahl der geeigneten Anregungs- und Messmethoden sowie die Soft- und Hardware zur Auswertung und Speicherung der Messdaten. Die Auswahl ist spezifisch und sehr stark vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Es gibt bisher keine Grundmessausrüstung, mit der jede Struktur gleichermaßen überwacht werden kann. Der Kostenfaktor steht bei der Wahl des Data Acquisition Equipments zur Dauerüberwachung im Vordergrund. Zudem muss je nach Anwendungsfall auch der Intervall, wann Daten gesammelt werden sollen, festgelegt bzw. angepasst werden. Bei einem Erdbeben sollten Daten unmittelbar vor und in periodischen Intervallen nach dem Ereignis aufgenommen und ausgewertet werden, während dies bei einer Maschine während dem kompletten Betrieb erfolgen sollte. [2]

Feature Extraction

Die Identifikation von „*data features*“ (deutsch: Merkmale von Daten) ist das wohl am aufmerksamsten betrachtete Teilgebiet des *SHM*. Es ermöglicht in vielen Fällen die Unterscheidung zwischen geschädigtem und ungeschädigtem Systemzustand. Um effektiv Features zu extrahieren werden Methoden der Signalverarbeitung verwendet, z.B. die Transformation einer gemessenen Zeitreihe in das Frequenzspektrum. Die Spektrallinien enthalten Informationen über den Systemzustand. Dies wird z.B. bei Getrieben eingesetzt. Ideale Features besitzen eine kleine Dimension und sind sehr sensitiv gegenüber Veränderungen des Systemzustandes. Eine andere Möglichkeit ist es, ein reales oder auf Messdaten basiertes, parametrisches Modell eines Systems zu erstellen. Diese Parameter oder vorhersagbaren Fehler dieser Modellen werden zu den schadenssensitiven Merkmalen. Vor allem die Normierung der Daten ist hier wichtig, da jede Messung unter verschiedenen Einflüssen stattfindet und somit die Vergleichbarkeit gewährleistet wird. [2]

Statistical model development for feature discrimination

Die Entwicklung statistischer Modelle werden aus den „*machine learning*“-Techniken abgeleitet, die in zwei Kategorien einzuteilen sind:

1. Supervised Learning (kontrolliertes lernen): Es liegen Daten der geschädigten und ungeschädigten Struktur vor und können zur Auswertung herangezogen werden.
2. Unsupervised Learning (freies Lernen): Der unbeschädigte Zustand liegt in Datenform vor. [2]

Die meist verwendeten Modelle im *SHM* können je nach Art der vorliegenden Daten, den zuvor genannten „*machine learning*“-Gruppen zugeordnet werden. Ein Algorithmus des „*supervised learning*“ ist die „*group classification*“, die eine Aussage über eine gewisse Anzahl diskreter Zustände trifft und die Kondition der Struktur am genauesten beschreibt. Die „*regression analysis*“ gibt den gegenwärtigen Zustand durch eine kontinuierliche Quantifikation des Systems wieder. Als Beispiel für das „*unsupervised learning*“ kann die Methode der „*identification of outliers*“ genannt werden. [5]

Es handelt sich um einen fünfstufigen Prozess, um die Identifizierung des Schadenszustandes nach Rytter [6] zu organisieren. Dieser lässt sich durch die folgenden fünf Fragen leiten:

1. Liegt eine Schädigung im System vor? (Existenz)
2. Wo befindet sich die Schädigung im System? (Ort)
3. Welche Art der Schädigung liegt vor? (Typ)
4. Wie schwerwiegend ist die Schädigung? (Ausmaß)
5. Wie viel nutzbare (sichere) Lebenszeit verbleibt noch? (Prognose)

Zur Implementierung von zwei Arten des *SHM* werden diese statistischen Modelle verwendet. Das erste Modell ist das „*protective monitoring*“. Es verwendet schadensensitive Features um das System zu überwachen. Sobald die Features vorher festgelegte Grenzwerte überschreiten, führt dies z.B. zu einem Abschalten des Systems bevor (weitere) Schädigungen eintreten. Das zweite Modell ist das „*predictive monitoring*“ und beobachtet Trends in Daten-Features und verwendet diese, um zu prognostizieren wann möglicherweise kritischere Schäden auftreten (Stichwort: Wartungsplanerstellung). [2] Die Methoden „*Data Acquisition*“, „*Feature Extraction*“ und „*Statistical Model Development for Feature Discrimination*“ des SPR benötigen wichtige Hilfsmittel zur Datenverarbeitung. Diese werden wie folgt definiert:

1. Data Normalization: Messdaten werden normalisiert, um eine Vergleichbarkeit eines Systems zu erzielen, z.B. bei verschiedenen Systemzuständen und Umwelteinflüssen.
2. Data Cleansing: Für die Features werden Daten ausgewählt oder verworfen. Oft erfolgt dieser Prozess empirisch. In der Signalverarbeitung werden z.B. Filter, Abtastrate, etc. angewendet.
3. Data Compression: Reduktion der Dimension von Messdaten ohne dabei sensitive Features zu eliminieren, die Aufschluss über den Zustand geben könnten.
4. Data Fusion: Die Kombination von Messdaten aus mehreren Quellen (z.B. eines Sensor Arrays) soll die Zuverlässigkeit des Prozesses zur Schadensidentifizierung verbessern. [2]

Vergleich von lokaler zu globaler Schadenserkenkung

Lokale Methoden zur Schadenserkenkung beschränken sich auf eine relativ kleine Umgebung auf/im Bauteil. Es werden Verfahren angewendet, die auch aus der ZfP schon bekannt sind, z.B. Wirbelstrom, Ausbreitung von [Ultraschallwellen](#) oder Magnetfelder. Die Anwendung von Ultraschallwellen wird sehr oft im Kontext mit „*guided waves*“ zusammengebracht, die mit Hilfe von Sensoren/Aktuatoren in die Struktur eingeleitet werden. Bei dieser Anwendung im Nahfeld des platzierten Sensors erschweren Reflektionen der Wellen an Bauteilgrenzen oder anderen Diskontinuitäten (Dickenänderung, Löcher, ...) die Schadensidentifikation. Lokale Methoden sind sehr sensitiv und ermöglichen es auch kleine Fehler zu identifizieren. Schädigungen im Material können z.B. die lokale Steifigkeit reduzieren, die damit das globale Verhalten der Struktur in Zeit und Raum verändern. Diesen Effekt nutzen globale Verfahren ebenfalls, sind aber nicht so sensitiv wie lokale Verfahren. Sie basieren auf niederfrequenten Schwingungen, mit denen das gesamte System überwacht werden kann. Dabei wird beispielsweise auf Änderungen in den Resonanzfrequenzen, der Dämpfung oder den Schwingungsmoden geschaut, die dann als Merkmal (möglichst schadenssensitiv!) extrahiert werden. Damit soll zwischen geschädigtem und ungeschädigtem Zustand unterschieden werden. Zur vollständigen Systemüberwachung kommen oft Kombinationen aus lokalen und globalen Methoden zum Einsatz. ^[1]

Fundamentale Axiome des SHM

Die letzten 30 Jahre der Forschung auf dem Gebiet des *SHM* haben eine Vielzahl sehr guter Erkenntnisse geliefert. Daraus lassen sich fundamentale Axiome formulieren, die allerdings nicht mit denen aus der Mathematik zu vergleichen sind. Sie stellen vielmehr allgemeine akzeptierte Prinzipien dar und repräsentieren fundamentale Ansätze einer jeden *SHM* Methodologie. Die Axiome lassen sich folgendermaßen formulieren:

- Axiom I: Jedes Material hat inhärente Risse oder Defekte.
- Axiom II: Schadensbewertung benötigt einen Vergleich zwischen zwei Systemzuständen.
- Axiom III: Die Identifizierung sowie Lokalisierung eines Fehlers kann durch unsupervised learning erfolgen. Die Identifizierung des Types und der „Schwere“ des Fehlers kann nur durch die Methode des supervised learnings erfolgen.
- Axiom IV a) Sensoren können keinen Schaden messen. Die Extrahierung des Features mit Hilfe der Signalverarbeitung und statistischer Klassifizierung sind nötig um Sensordaten in Informationen über die Schädigung zu konvertieren.
- Axiom IV b) Ohne intelligente Extraktion der Features gilt: Je sensitiver eine Messung bezüglich Schädigungen ist, desto sensitiver ist diese gegenüber operationellen Änderungen und Umwelteinflüssen.
- Axiom V: Die Längen- und Zeitskalen in Verbindung mit dem Schadensbeginn bzw. der Schadensevolution geben die benötigten Eigenschaften des *SHM* Sensing Systems vor.
- Axiom VI: Es existiert ein Kompromiss zwischen der Sensitivität eines Schadens bezüglich des Algorithmus und seiner Fähigkeit zur Rauschunterdrückung.
- Axiom VII: Die detektierbare Größe eines Schadens durch Änderungen in der Systemdynamik ist invers proportional zu dem Frequenzbereich der Anregung.
- Axiom VIII: Schädigungen erhöhen die Komplexität der Struktur.

Diese Axiome sind in *Structural Health Monitoring - A Machine Learning Perspective* definiert und ausführlich beschrieben. ^[2]

Komponenten des SHM

Die folgenden grundlegenden *SHM* Komponenten unterscheiden sich für unterschiedliche Anwendungsfälle kaum. Sie dienen als eine Übersicht über die grundlegenden Bestandteile eines Systems zur Dauerüberwachung:

- System/Struktur
- Sensor und Sensorsysteme (Wired und [Wireless Systeme](#) ^[2])
- Systeme für die Data Acquisition
- Speicherung und Transfer von Messdaten
- Management der Messdaten
- Interpretation und Diagnose der Messdaten

Sensorsysteme werden auf Strukturen wie z.B. Satelliten, Brücken, Flugzeuge, etc. zur Dauerüberwachung installiert. Aufgenommene Messdaten werden z.B. nach dem Verfahren des „*Statistical Pattern Recognition*“ (deutsch: statistische Mustererkennung) ausgewertet und verarbeitet, um eine Überwachung der Struktur in Echtzeit („*real-time*“) durchzuführen.

Beispiele der Anwendung von SHM Methoden

- [Canton Tower, China](#): Über 800 Sensoren wurden auf der äusseren Struktur des Towers platziert, um die Konstruktion und strukturelle Alterung zu überwachen.

- [Golden Gate Bridge, USA](#): Implementierung von 64 Wireless-Sensorknoten verteilt über die Golden Gate Bridge ist das größte Wireless Netzwerk für *SHM*.
- [International Space Station](#): Erfolgreiche Dauerüberwachung der ISS Struktur via *SHM*, sichert auch zukünftige Raummissionen.
- [Windenergieanlagen](#): Online-Dauerüberwachung von Windenergieanlagen soll Wartungsintervalle reduzieren oder auch das Abschalten der Anlage bei kritischen Systemzuständen hervorrufen.

Literatur

Bücher

1. Balageas, D. ; Fritzen, C.-P.; Güemes, A.: *Structral Health Monitoring*. ISTE Ltd, 2006.
2. Farrar, C.; Worden, K.: *Structural Health Monitoring - A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
3. Chang, F. - H.: *Structural Health Monitoring: A Summary Report on the First International Workshop on Structural Health Monitoring, September 18-20, 1997*. In *Structural Health Monitoring 2000, Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, September 8 - 10, 1999, Lancaster - Basel, Technomic Publishing Con, Inc, pp. xix-xxiv, 1999.
4. Cherkassky, V.; Mulier, F.: *Learning from Data: Concepts, Theory and Methods*. Wiley-Blackwell, 2007.
5. Overbey, L. A.: *Time Series Analysis and Feature Extraction Techniques for Structural Health Monitoring Applications*. ProQuest, UMI Dissertation Publishing, 2011.
6. Rytter, A.; Brincker, R.; Pilegaard Hansen, R. L.: *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Aalborg Universitet (DK). Inst. for Bygningsteknik, 1993.
7. Stepinski, T.; Uhl, T.; Staszewski, W.: *Advanced Structural Damage Detection - From Theory to Engineering Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

Externe Links

- [Structural Health Monitoring Group, University of California, San Diego](#)
- [Engineering Institute, Los Alamos National Laboratory](#)
- [International Society of Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure ISHMII](#)
- [Institute for Technical Mechanics, University of Siegen](#)
- [Laboratory for Intelligent Structural technology, University of Michigan](#)

Conferences

- [International Workshop on Structural Health Monitoring \[IWSHM\]](#)
- [SPIE-Symposium on Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation and Health Monitoring](#)
- [European Workshop on Structural Health Monitoring \[EWSHM\]](#)
- [International Conference on Damage Assessment of Structures \[DAMAS\]](#)
- [World Conference on Structural Control and Monitoring \[WCSCM\]](#)

Journals

- [Journal of Civil and Structural Health Monitoring](#)
- [Structural Control and Health Monitoring \[John Wiley & Sons, Ltd.\]](#)
- [Structural Health Monitoring – An International Journal \[sagepub\]](#)
- [Structural Durability and Health Monitoring](#)
- [Journal of Intelligent Material Systems and Structures \[sagepub\]](#)
- [Smart Materials and Structures \[IOP\]](#)