



## Messen im Bauwesen 2010

### Bauwerksüberwachung bei bestehenden Brückenbauwerken durch BRIMOS

Prof. Dr. Helmut Wenzel

#### 1. Einleitung

Die Entwicklung des PCs und neuer Sensoren hat die Baumesstechnik revolutioniert. Durch die Verbesserung von Hard- und Software erschließen sich neue Aufgabengebiete, in denen innovative Lösungen angeboten werden können. Interdisziplinäres Denken ist dabei eine Grundvoraussetzung und die Grenzen zwischen den klassischen Disziplinen verschwimmen zunehmend. Die Kategorisierungen wie, die Bauingenieure messen Spannungen und die Maschinenbauer Schwingungen, verlieren ihre Bedeutung. Nicht zuletzt daraus hat sich der neue Studienzweig Mechatronik entwickelt.

Aus der einfachen elektronischen Überwachung von Maschinen wurde die Gesundheitsüberwachung von Bauwerken und Bauteilen (Structural Health Monitoring). Die Forschung konzentriert sich derzeit auf das Thema Schadenserkennung, Schadenslokalisierung und Schadensquantifizierung. Die größere Herausforderung ist dabei die Interpretation der zahlreichen gesammelten Daten.

Andererseits erfordern neue Normen sowie der wirtschaftliche Druck auf die Planer eine bessere Überwachung der Produkte. Daraus ergeben sich die Notwendigkeit und die Chancen der modernen Baumesstechnik. Die Reduktion der Sicherheiten aus gut entwickelten Entwurfspraktiken bedingt eine bessere Kenntnis der tatsächlichen Verhältnisse. Da jedes Bauwerk ein Prototyp ist, ist der Nachweis der planungsgerechten Ausführung immer wieder zu erbringen. In der Praxis hat sich herausgestellt, dass die Unterschiede zwischen Planung und existierendem Bauwerk erstaunlich groß sind. Dies betrifft vor allem kleinere steife Bauwerke. Dies legt nahe, dass einerseits beträchtliche Tragreserven vorhanden wären, die noch ausgeschöpft werden können. Andererseits bedingt ein falsches Funktionieren eines Bauwerkes sehr oft Folgeprobleme, die teuer gelöst werden müssen.

## 2. Schadenserkennung und -beurteilung

Auf Baudynamik basierende Überwachungsmethoden haben sich in den letzten Jahren gut entwickelt. Trotzdem wurde der Durchbruch in der praktischen Anwendung noch nicht geschafft. Die Ursachen dazu sind in ihrer Komplexität und oft in ihrer geringen Anwenderfreundlichkeit zu suchen.

### 2.1 BRIMOS

Das Diagnoseverfahren BRIMOS® basiert heute auf einer bereits seit mehr als 15 Jahren konsequent entwickelten, anwenderorientierten Forschungsarbeit auf nationaler & internationaler Ebene. Das entstandene Know-How stützt sich auf weltweit mehr als 1000 gemessene Bauwerke, wodurch der Anbieter als einer der weltweit führenden Akteure im Bereich angewandter Baudynamik gilt.

Dadurch kann ein umfassendes Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten für jeden Abschnitt innerhalb der betrieblichen Nutzung abgedeckt werden (Life-cycle-management), welches unabhängig von der Art der Tragstruktur und des eingesetzten Materials ist.

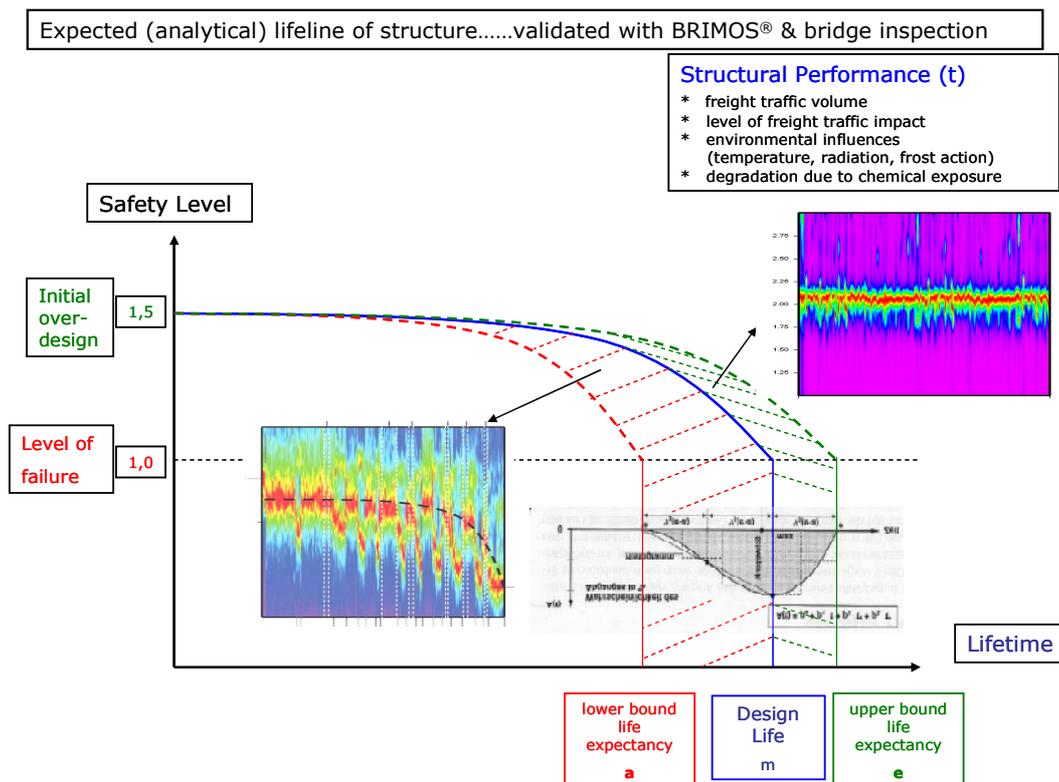


Abb. 1: BRIMOS Flussdiagramm; Bauwerksbewertung

Kernaufgabe des Competence Centers BRIMOS ist die Bereitstellung und konsequente Weiterführung einer Technologie, welche den Prozess der Entscheidungsfindung von Infrastruktureigentümern und –betreibern im Rahmen der Bauwerkserhaltung maßgeblich unterstützt.

Dabei wurde bereits sehr früh erkannt, dass durch eine Evaluierung des Schwingungsverhaltens der analysierten Struktur den konventionellen, visuellen Bewertungsmethoden ein verlässliches, objektivierendes Verfahren zur Seite gestellt werden kann. Basierend auf den Grundsätzen der Baumechanik werden maßgeschneiderte Schwingungsmessungen und numerische Simulationen verknüpft. Während die Analyse der Bauwerke in erster Linie auf der experimentellen Bauwerksmessungen fußt (gemessene Physik), so ermöglichen Finite Elemente Vergleichsrechnungen ein vertieftes Verständnis zum Tragwerksverhalten und erweitern die Möglichkeiten einer relevanten Ergebnis-Interpretation.

Die zerstörungsfreien Messungen werden bei unterbrechungsfreiem Regelbetrieb durchgeführt, da das Verhalten unter diesen Bedingungen erfasst und hinsichtlich einer Identifikation & Lokalisierung etwaiger Problembereiche bewertet werden soll.

## **2.2 Grundelemente des dynamischen Monitorings**

Monitoring wird nur funktionieren, wenn die Aktivität ganzheitlich gesehen wird und alle Aspekte von der Forschung bis zu den anwendbaren Resultaten abdeckt. Die nachfolgende Grafik zeigt die 12 Grundelemente, die dabei anzusprechen sind.

### **Konzept und klare Ziele**

Monitoring ist kein Selbstzweck sondern soll klaren Zielen folgen und bestimmten Anforderungen entsprechen. Dies umfasst die Beschreibung der erwarteten Ergebnisse genauso wie deren Genauigkeitsanforderung.

### **Optimierung und Kostenkontrolle**

Da jedes Monitoringsystem ein Prototyp ist, kann die Optimierung eine wesentliche Rolle spielen. Als Ergebnis ist dem Kunden eine Lösung zu präsentieren, die die Anforderungen erfüllt, jedoch auf die Grenzen des Systems und seine Unschärfen hinweist.

### **Hardware**

Zu oft wird Hardware gewählt, weil sie gerade vorhanden ist. Die Konsequenzen des Einsatzes nur bedingter Hardware werden selten dargestellt.

### **Software**

Das Softwareangebot ist entweder generell zu spezifisch und anwenderunfreundlich oder zu allgemein, um eine verwendbare Aussage zu erzielen. Die Software soll den Anwender nicht belasten sondern unterstützen. Ein modularer Aufbau ist dabei hilfreich.

### **Kommunikation und Webinterface**

Jede Anlage soll entsprechende Kommunikationsmöglichkeiten bieten. Dies dient nicht nur der periodischen Kontrolle der Funktion, sondern auch der Steuerbarkeit des Prozesses. Ergebnisse müssen webtauglich sein und gängige Plattformen bedienen.

### **Einbau und Inbetriebnahme**

Fehler beim Einbau sind nachher kaum wieder gut zu machen. Bei der Inbetriebnahme ist daher auf einen sorgfältigen Überprüfungsvorgang aller Funktionen zu achten. Die Möglichkeit eventueller Veränderungen vor Ort sollte gegeben sein. Ferner ist es ratsam, eine Ansprechperson im Personal des Kunden zu finden, die für kleine Interventionen wie Stromausfälle etc. Unterstützung leistet.

### **Berichtsstruktur**

Berichte müssen auf den jeweiligen Empfänger zugeschnitten sein. Der Kunde benötigt eine übersichtliche Kurzzusammenfassung der relevanten Ergebnisse. Das Monitoringteam benötigt einen Überblick über die Daten, Resultate und die Statusmeldung der Anlage. Für die wissenschaftliche Verwendung ist eine Datenintegration und Rohdaten wichtig. Diese Struktur ist für den jeweiligen Anwendungsfall neu zu konzipieren. Da der Bericht den Hauptkontakt zum Kunden darstellt ist auf dessen Wirkung besonders zu achten. Wesentliche Unterschiede gibt es dabei auch durch individuelle Wünsche des angesprochenen Personals.

### **Periodische Berichte**

Der Eigentümer einer Monitoringanlage möchte über deren Performance unterrichtet werden. Die periodischen Berichte sollen daher auf Überblicksergebnisse konzentriert sein und den Eindruck untermauern, dass alles funktioniert wie es soll. Die Möglichkeit vorangegangene Berichte über das Internet wieder aufzurufen soll gegeben sein.

### **Datenanalyse und Interpretation**

Die Dynamik von Bauwerken unterliegt Schwankungen, die aus der Nutzungsart und den Umweltbedingungen resultieren. Um nicht wichtige Informationen im Umweltrauschen zu verlieren sind die Daten jeweils auch bei Standardanwendungen zu analysieren. Die

Interpretation dient dazu, die Modelle zu kalibrieren und die Unsicherheiten zu verkleinern. Die Ergebnisse dieser Analyse können direkt in die Software einfließen und ein späteres automatisches Erstellen derartiger Analysen ermöglichen. Bei Angeboten ist insbesondere darauf zu achten, dass ein entsprechender Budgetposten für diese arbeitsintensive Aufgabe vorhanden ist.

### **Grenzwerte und Warnungen**

Für ein Warnsystem werden vorerst sehr weit gefasste Grenzwerte eingegeben, welche durch die jeweiligen Analysen bestätigt oder widerlegt werden. Die Qualität der Ergebnisse wird da mit jedem Analyseschritt besser. Warnungen sollten erst aktiviert werden, wenn die entsprechenden Niveaus gefestigt sind. Mehrere Fehlalarme erschüttern das Vertrauen in das System und können zu Misserfolgen führen. Ein hierarchisches Warnprinzip hat sich bewährt, wobei das Monitoringteam bei geringeren Problemen zuerst verständigt wird und einen Alarm an den Anwender bestätigen muss. Die entsprechenden Grenzwerte werden anschließend in den periodischen Report aufgenommen.

### **Periodische Wartung**

Monitoringsysteme sind elektronische Komponenten, welche im rauen Umfeld des Bauwesens besonderen Schutzes bedürfen. Weiters besteht eine wesentliche Diskrepanz in der Lebenserwartung eines Monitoringsystems im Vergleich zum Bauwerk. Der periodischen Wartung kommt daher besondere Bedeutung zu und diese wird zum Erfolg wesentlich beitragen. Wartungsintervalle von einem oder 2 Jahren sind üblich.

### **Systemupdate**

Da eine stürmische Entwicklung auf diesem Sektor stattfinden, stehen häufig Updates zur Verfügung. Diese erlauben oft eine Verbesserung der Leistung ohne die Hardware ändern zu müssen. Ein Feedback einer upgedateten Anlage zum Gesamtkonzept erscheint daher sinnvoll.

Generell hat es sich als nützlich erwiesen, jedem dieser Punkte einen entsprechenden Budgetanteil an einer Monitoringkampagne zuzuweisen.

## **3 Bauwerksüberwachung und Beurteilung**

Hier ist im Wesentlichen zwischen Routineüberwachung der großen Anzahl von Bauwerken und der Überwachung von speziellen Sonderbauwerken zu unterscheiden. Die große Flotte an Bauwerken benötigt einfache, schnelle und daher auch billige Verfahren, welche es ermöglichen, eine rasche Klassifizierung und damit die Erstellung einer Prioritätenliste durchzuführen. Danach erst kommen die verfeinerten Methoden zum Einsatz, mit der dann Details ermittelt werden können. Hier hat sich insbesondere die Methode der ambienten Schwin-

gungsüberwachung etabliert. Der von VCE entwickelte so genannte virtual bridge doctor hat sich sehr bewährt. Analog zum Menschen, wo Schäden sich durch Schmerzen über die Nervenbahnen im Gehirn manifestieren, wird bei den Brücken Schwingungen gemessen, welche bei Abweichungen vom Sollzustand virtuelle Schmerzen im Entscheidungssystem hervorrufen.

Als einige herausragende Beispiele seien hier die Olympic Grand Bridge in Seoul, Korea angeführt, welche durch einen Hubschrauberabsturz beschädigt wurde, die Commodore Barry Bridge in Philadelphia in den USA, wo ein unglückliches Entwurfsprinzip eine aufwändige Sanierung notwendig machte, der schwimmende Pier von Monaco, welcher in Spanien produziert, über das Mittelmeer nach Monaco geschleppt und dort verankert wurde. Die Koror Brücke auf den Philippinen, welche 1996 eingestürzt ist. Die zahlreichen BRIMOS Projekte von VCE in Österreich und weltweit.



Abb. 2: Bauzustand der Svinesundbrücke in Schweden

#### **4. Demonstration am Objekt S101**

Innerhalb des IRIS Projektes werden zahlreiche Demonstrationen ermöglicht. Die Überführung S101 über die Westautobahn in Österreich ist ein typisches Objekt der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts. Diese vorgespannten Betontragwerke sind durch große Schlankheit und geringen Bewehrungsgehalt gekennzeichnet. Zu geringe Betonüberdeckung hat zu sichtbaren Korrosionsschäden geführt, sodass Zweifel an der Integrität des Bauwerkes bestehen. Der Abbruch der S101 wurde herangezogen, um mehrere Schädigungstests durchzuführen und dabei das dynamische Verhalten durch Monitoring zu erfassen. Ein Längs- und ein Querschnitt sind in nachfolgender Grafik gezeigt.

## 4.1 Messkampagnen

Die Monitoringkampagne erstreckte sich über 4 Tage im Dezember 2008. Das dabei vorherrschende konstante Wetter ohne Sonneneinstrahlung macht die Umwelteinflüsse leicht beherrschbar. Das Tragwerk wurde durch mehrere unterschiedliche Messkampagnen beobachtet:



Abb. 3: Versuchsobjekt S101 and der Westautobahn A1 in Österreich

BRIMOS Messung mit 42 Beschleunigungsaufnahmen hoher Sensibilität sowie 2 separaten Laserkanälen. Diese Anlage ist vom Beginn der Arbeiten bis zum Ende durchgehend in Betrieb gewesen

Messung mittels BRIMOS Rekorder, also einem 3-dimensionalen Beschleunigungsaufnehmer, welcher in Tragwerksmitte aufgestellt wurde. Die Messungen erfolgten nur während der Schädigungen

Messung mittels Wireless Sensor Network betrieben durch die Universität Tokio, wobei zahlreiche Aufstellungen auf dem Tragwerk gewählt wurden

Die ausgereifte BRIMOS Technologie mit ihrer erprobten Hardware hat problemlos über die gesamte Zeit funktioniert. Die eingesetzte Wireless Anlage hatte mit der Kälte und den widrigen Witterungsbedingungen zu kämpfen. Der Bedarf an Batterien war stark unterschätzt worden. Letztendlich hat diese Anlage jedoch auch brauchbare Ergebnisse geliefert.

## 4.2 Relevante Ergebnisse

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sämtliche Schädigungstests, so gering sie auch waren, ihre Spuren in der dynamischen Antwort hinterlassen haben. Die nachfolgende Grafik gibt einen Überblick über das Verhalten der fundamentalen Eigenfrequenzen über den gesamten Zeitraum. Die Änderung in der spektralen Charakteristik lässt sich gut erkennen. Ein parallel dazu geführtes numerisches Modell (ANSYS) stimmt ausreichend gut mit diesen Ergebnissen überein. Der Beweis, dass sich bereits geringfügige Änderungen in der Spekt-

ralcharakteristik zeigen, wurde erbracht. Darüber hinaus ist es gelungen bei diesen Feldtests einige Phänomene, die bisher nur im Labor beobachtet wurden, nachzuvollziehen. Diese sind:

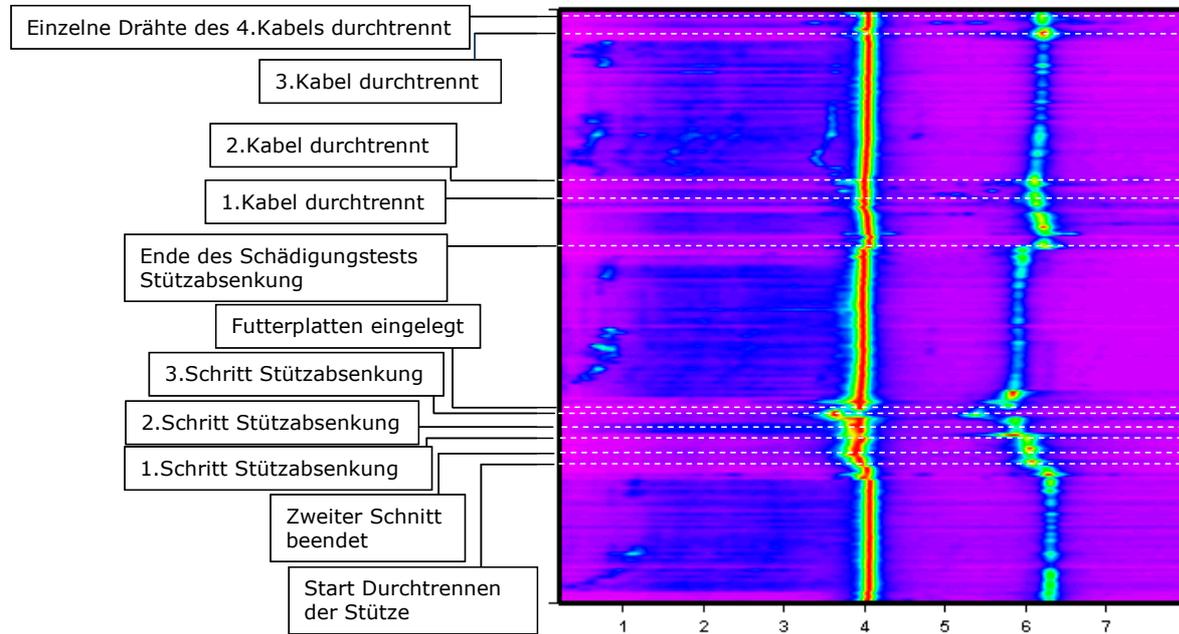


Abb. 4: Schadensmanifestation im Niederfrequenzbereich

Im Falle eines Schadens bewirkt dessen Auftreten einen Energietransfer von den niedrigen Modes, was sich in höheren Amplituden der höheren Modes zeigt. Die Amplituden der fundamentalen Modes flachen dadurch ab und zeigen eine höhere Systemdämpfung an, welches als Schadensindikator verwendet werden kann

Für Dauermessungen lassen sich gut um Umwelteinflüsse bereinigte Frequenzbänder bestimmen, die den Sollzustand beschreiben. Abweichungen dazu können bis zum Erreichen der Toleranz ignoriert werden, aber unter Umständen trotzdem einen Trend anzeigen. Umweltbedingte Abweichungen folgen eher kurzfristigen Trends

Die Suche nach Informationen in höheren Frequenzen (bis 200 Hz) verspricht noch weitere Indikatoren für Schädigungen. Daran wird noch gesondert zu arbeiten sein

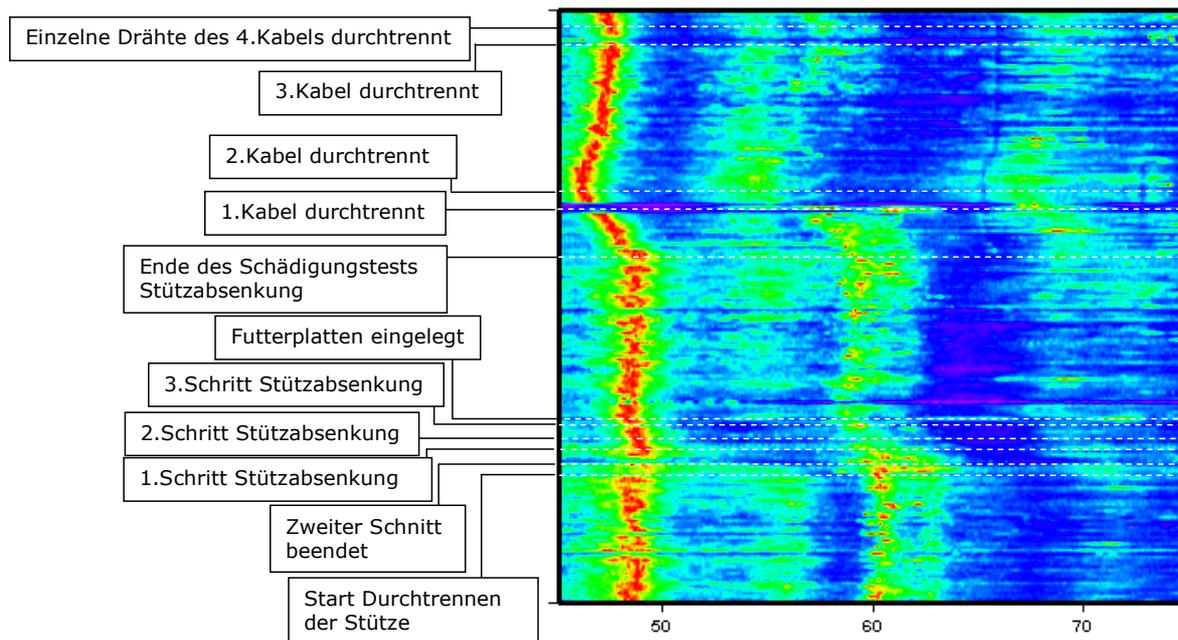


Abb. 5: Schadensmanifestation im Hochfrequenzbereich

## 5. Zusammenfassung

Durch das Monitoring der Dynamik von Bauwerken lassen sich wertvolle Aufschlüsse über deren Zustand gewinnen. Die wichtigsten Voraussetzungen dazu sind jedoch:

Die Definition von klaren Zielen

Eine Optimierung der Messanlage und Planung ausreichender Redundanz

Die Abstimmung der Messanlage auf die gewählte Auswertemethodik

Die Wahl der geeigneten Datenanalyse und Interpretation

Dem Verständnis, dass Monitoringanlagen Computer sind und daher einer Wartung bedürfen

Werden alle relevanten Umstände berücksichtigt werden die Ergebnisse sehr gut sein und großen Anklang finden. Trotzdem wird es notwendig sein gegen die bereits weit verbreitete Annahme, dass Monitoring den Aufwand nicht lohnt, angeköpft werden müssen. In der Praxis gibt es leider mehr schlechte als gute Beispiele und erfolgreiche Kampagnen benötigen ausreichend Disziplin sowie Erfahrung. Lösungen, bei denen die Elemente einer Kampagne getrennt werden und wo nicht ausreichend Bauwerkexpertise vorhanden ist, werden immer problematisch bleiben. Trotzdem ist zu hoffen, dass durch die modernen EDV-Lösungen wesentlich bessere Ergebnisse erzielt werden und damit eine größere Akzeptanz dieses wertvollen Instruments für die Bauwerkbeurteilung entsteht.

Die interdisziplinäre Baumesstechnik hat einen Reifegrad erreicht, der es erlaubt rasch Entscheidungsgrundlagen zu schaffen. Dadurch werden Kosten und Bauzeit gespart, sowie sicherere und bessere Bauwerke errichtet. Die Entwicklung konzentriert sich dabei im Wesentlichen auf Sensoren und Datenakquisition in den USA, die online Überwachung großer Bauwerke in Asien und die Erforschung neuer Methoden zur Schadenserkennung in Europa. In Amerika und Asien werden dabei wesentlich höhere Beträge in die Forschung investiert.

Die Zusammenarbeit der Disziplinen wird eine wesentliche Verbesserung der Situation bringen, da neue Felder erschlossen werden und ein größerer Kreis von der Entwicklung profitiert. Die zunehmend komplexer werdenden Aufgaben müssen jedoch von EDV-gestützten Auswerte- und Entscheidungshilfeverfahren unterstützt werden, um ihre volle Wirksamkeit zu entfalten. Es gibt noch einen großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf diesem Sektor, der in Europa nur unzureichend wahrgenommen wird. Die zahlreichen hervorragenden Projekte sollten jedoch Anlass genug sein, sich weiter um die Entwicklung und Vermarktung zu bemühen.

## 6. Referenzen

Wenzel, H., 2009. "Health Monitoring of Bridges," *J. Wiley and Sons Ltd., Chichester - England, ISBN 9780470031735*

Wenzel, H., and D. Pichler. 2005. "Ambient Vibration Monitoring," *J. Wiley and Sons Ltd., Chichester - England, ISBN 0470024305*

Veit R., H. Wenzel and J. Fink. 2005. "Measurement data based lifetime-estimation of the Europabrücke due to traffic loading - a three level approach", *In International Conference of the International Institute of Welding. Prague*

E. Forstner and H. Wenzel, 2004, "IMAC – Integrated Monitoring and Assessment of Cables, Final Technical Report", *IMAC Project.*

De Roeck, G.; Peeters, B.; Maeck, J.: "Dynamic monitoring of civil engineering structures." *Computational Methods for Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2000, Greece, 2000*

Cantieni, R.: *Dynamic "Load Tests on Highway Bridges in Switzerland – 60 Years Experience of EMPA."* *Section Concrete Structures and Components, Report No. 211, Dübendorf, Switzerland 1983*