

# Optische Schwingungsmessung: Status, Integration, Pros und Contras

KIRA ZSCHIESCHE, LINDA RAU & MARTIN SCHLÜTER

Am Beispiel einer Eisenbahn-Stahlbrücke erarbeiten wir prototypisch die relevanten Einzelschritte von der mobilen Erfassung kontrollierter Schwingungsdaten bis zur Integration in die Bauwerksdatenmodellierung (BIM). Dieser Aufsatz umfasst einen Abriss bestehender Systeme zur Schwingungsbeobachtung an gealterten Bestandsbauwerken und geht dabei besonders auf die Vor- und Nachteile der optischen Schwingungsmessung ein. Es zeigt sich, dass die optische Schwingungsmessung hierbei eine wirtschaftliche Ergänzung zu bestehenden Systemen darstellt. Näher beschrieben wird das Erfassen von Schwingungen mittels modularer Digitalkameratachymetrie. Präzisionstachymeter können mit Digitalkameras am Okular kombiniert werden. Diese Erweiterung in Verbindung mit der digitalen Bildverarbeitung ermöglicht die automatische Detektion von Zielen und somit auch die berührungslose Erfassung von Schwingungen. Es ist nicht erforderlich das Ziel mit dem Fadenkreuz konkret anzuvisieren. Unzugängliche Objekte, wie z.B. Brückenbauwerke, Fabrikschlote oder Türme für Windenergieanlagen, können ohne Signalisierung durch die modulare Digitalkameratachymetrie hochfrequent durch die Messung natürlicher Ziele diskret, optisch und ad hoc erfasst werden. Es ist kein Eingriff am Objekt notwendig.

**Schlüsselworte:** Structural Health Monitoring, modulare Kameratachymetrie, Schwingungsmessungen, BIM

## 1. Einleitung/Motivation

Die systematische Beobachtung oder Überwachung von Objekten gehört seit langem zu den Dienstleistungen der Geodäsie. Oft reicht ein einziges Verfahren nicht aus, um das komplexe Verhalten eines Objektes in seiner Gesamtheit zu erfassen. Um das Gesamtsystem eines Bauwerks im Sinne eines Structural Health Monitoring (SHM) zu erfassen, sind neben geodätischen Überwachungsmessungen auch dynamische Analysen erforderlich (NEITZEL & SCHWARZ 2017). Verschiedene Verfahren zur optischen Erfassung von Schwingungen haben sich dabei als erfolgreich einsetzbar qualifiziert. Die hier vorgestellten Systeme haben miteinander gemein, dass sie unmittelbar einsetzbar sind, ohne das Bauwerk invasiv bearbeiten zu müssen. Generell müssen meteorologische Einflüsse berücksichtigt werden. Um eine Beurteilung eines Bauwerkes als Gesamtes im SHM zu ermöglichen, sind weitere Daten zu erheben und fachübergreifend zu analysieren. Eine Möglichkeit, diese Daten zentral zugänglich zu machen, bietet dabei das Building Information Modeling (BIM) als Plattform zur Darstellung und Analyse der untersuchten

Eigenschaften des Bauwerkes. Am Beispiel einer Schwingungsmessung mit einem Modularen Digitalkameratachymeter an einer Stabbogenbrücke stellen wir einen prototypischen Ablauf inkl. der Integration in ein BIM dar.

## 2. Optische Messsysteme

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene berührungslose optische Messverfahren zur Schwingungsbeobachtung von Bauwerken vorgestellt, um einen Überblick über erprobte Verfahren zu geben und ggf. die jeweiligen Stärken und Schwächen herausarbeiten zu können. Zunächst wird kurz das jeweilige Messprinzip erläutert und dann näher auf die Vor- und Nachteile eingegangen. Ausführlicher wird dabei auf das Prinzip mittels modularen Digitalkameratachymeter eingegangen, welches wir exemplarisch einsetzen.

Digitale Kameras eignen sich ganz allgemein zur optischen Beobachtung von Objektbewegungen transversal zur Blickrichtung, wenn sie eine ausreichende Bildwiederholrate anbieten. Handelsübliche Industriekameras erreichen bei Auflösungen von 2 bis 5 MP derzeit kontinuierliche Aufnahmeleistungen von etwa 50 bis 100 Bildern. Mehrere CMOS-Hersteller wie z.B. Sony oder e2v integrieren hardwareseitig die optionale Steigerung der Aufnahmeleistung über die Auswahl von Bildbereichen (Area of Interest), das Zusammenfassen benachbarter Pixel (Binning), das systematische Ignorieren von Pixeln (Subsampling) und/oder das hardwareseitig implementierte, rechnerische Reduzieren der Auflösung (Scaler), (SCHLÜTER & HAUTH 2015). Bildwiederholraten bis weit über 1000Hz werden generell über Zugeständnisse an die Auflösung oder über Bildausschnitte erkauft. Im Extremfall wird der Bildausschnitt auf eine einzelne Sensorzeile (Linescan) beschränkt.

Der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera bedingt ausreichende Lichtverhältnisse sowie ein ausreichend texturiertes Objekt oder ersatzweise eine künstliche Signalisierung. Bei nur einer Kamera werden Verfahren der Bildkorrelation zum 1D- oder 2D-Tracking von Objektpunkten genutzt, ab zwei Kameras können über die Ansätze der Stereo- und Mehrbildphotogrammetrie auch 3D-Koordinaten verfolgt werden, im Anschluss an eine Bestimmung der relativen oder absoluten Orientierung der Kameras. Besonderes Augenmerk ist dann auf die Zeitsynchronisation der Kameras zu legen, da auch bei sehr hohen Bildraten die Sensorbelichtung gleichzeitig erfolgen muss (LUHMANN 2017). Photogrammetrische Ansätze profitieren von Optiken mit kurzen Brennweiten, (ALLEMANT ET AL. 2018). Das Verhältnis von Basislänge zu Aufnahmeentfernung sollte 1:4 nicht überschreiten, generell sind Aufnahmeentfernung und Auflösung linear voneinander abhängig.

Bei Modularen Digitalkameratachymetern wird ein motorisiertes Tachymeter mit einer digitalen Industriekamera kombiniert. Im Unterschied zu den photogrammetrischen Verfahren wird hier gezielt mit der langen Brennweite des Tachymeterfernrohrs gearbeitet. Dies ist möglich, indem die äußere Orientierung der Kamera direkt durch das Tachymeter gemessen wird. Die maximale Aufnahmeleistung ist abhängig von der gewählten Industriekamera. Im vorliegenden Fall wurde eine Leica Nova MS50 MultiStation mit einer IDS-Kamera Modell UI-3080CP-M gekoppelt. Diese verfügt über einen Line Scan-Modus und einem AOI-Bildmodus (Area of Interest). Durch die Möglichkeit, einen kleineren Bildausschnitt bzw. nur eine einzelne Zeile zu beobachten, kann die Belichtungszeit und maximale Frequenz variabler gewählt werden. Abbildung 1 verdeutlicht den modularen

Aufbau des Messsystems. Die linke Seite zeigt die Komponenten des Messsystems. Auf der rechten Seite ist das Digitalkameratachymeter mit befestigter Industriekamera am Okular mit Zugenlastung und GeoCom-Kabel zur Auswerteeinheit ersichtlich.



**Abbildung 1:** Komponenten des modularen Digitalkameratachymeters und deren Aufbau (links), Detailansicht Kamera (rechts)

Mittels des Tachymeters kann das Messsystem präzise im Raum orientiert werden und ermöglicht so die absolute Bestimmung des Objektes. Die am Okular montierte Kamera kann durch wenige Handgriffe ausgetauscht werden und liefert durch die Bildverarbeitung eine automatische Detektion des Zielobjektes, sofern dieses innerhalb des kalibrierten Bereichs des Fernrohrblickfeldes des Tachymeters sichtbar ist. Das konkrete Anfahren des Zieles mit dem Fadenkreuz ist nicht erforderlich. Dies vereinfacht deutlich den Messablauf. Die softwareseitig implementierte automatisiert ablaufende Selbstkalibrierung stellt nach einem erfolgten Kamerawechsel in kurzer Zeit die Messbereitschaft wieder her. Das Messverfahren ermöglicht die berührungslose und hochfrequente Messung natürlicher Ziele am Bauwerk. Eine Installation von Messmarken entfällt vollkommen, so dass ein Ad-Hoc-Einsatz einen großen Vorteil des Systems darstellt. Der Abstand zum Objekt variiert je nach verwendeter Kamera und Umgebungsbedingungen, für die Steigerung der Messgenauigkeit ist eine möglichst nahe Positionierung sinnvoll.

Die Einsetzbarkeit von kameragestützten Totalstationen zur Erfassung von Schwingungen an Bauwerken wird in GUILLAUME ET AL. (2016), WAGNER (2017) und EHRHART ET AL. (2017) aufgezeigt.

Das Messprinzip des terrestrischen Laserscanners beruht auf einem Laserimpuls, welcher in Richtung der Messoberfläche mit Hilfe eines Spiegels abgelenkt wird. Nach der Reflexion am Objekt gelangt der Impuls in den Detektor. Über die Messlaufzeit des Laserimpulses kann der Abstand berechnet werden. Es wird unterschieden in Impulslaufzeit-, Phasenvergleichs- und Triangulationsverfahren. Bei ersterem wird aus der bekannten Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, der Brechzahl der Atmosphäre und der gemessenen Laufzeit die gesuchte Entfernung berechnet. Beim Phasenvergleichsverfahren wird über die Phasenverschiebung der ausgesandten Welle die gesuchte Entfernung indirekt bestimmt. Da die Anzahl der durchlaufenden Sinusschwingungen nicht bekannt ist, muss das Mehrdeutigkeitsproblem durch Überlagerung der Trägerwelle mit mehreren Modulationswellen gelöst werden.

Terrestrische Laserscanner können für sehr große Abstände eingesetzt werden, bis zu acht

Kilometer bei Impulslaufzeitverfahren. Die Messung kann schnell und großflächig durchgeführt werden, wobei die Größe der Fläche direkten Einfluss auf die Dauer der Messung hat. Der Standort wird dabei so gewählt, dass die Messung in Blickrichtung der Schwingung erfolgt. Die Messgenauigkeit liegt, unter idealen Bedingungen, im Millimeterbereich. Ein Nachteil ist unter anderem die Sicherheitsvorschrift für Laseranwendungen die gegebenenfalls beachtet werden muss.

Die Eignung von TLS zur Bestimmung von Eigenfrequenzen wurde unter anderem nachgewiesen durch VEENEGEERTS & KUTTERER (2007) zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Windkraftanlagen und durch NEITZEL ET AL. (2012) bei der Schwingungsüberwachung von Brücken. Durch den Einsatz eines Profilschanners und somit die wiederholte Beobachtung entlang eines Messprofils zeigen SCHILL & EICHHORN (2019) am Beispiel eines Brückenbauwerkes den erfolgreichen Einsatz dieses Messsystems.

Ein weiteres mit Laser arbeitendes Messsystem zur Schwingungserfassung ist das Vibrometer. Die Vibrometrie bedient sich dem Doppler-Effekt um Bewegungen der zu messenden Oberfläche zu detektieren. Der verbaute Laser wird dabei auf das Objekt fokussiert. Bei einer Bewegung des Objektes kommt es zu einer Frequenzverschiebung des zurückgestreuten Lichtes, welches mittels eines Interferometers ausgewertet werden kann. Der Controller des Messsystems kann dann wiederum das elektrische Signal umwandeln, welches zur Geschwindigkeit oder dem Weg proportional ist. Die Schwingung wird dabei in Richtung des Laserstrahles erfasst. Die Lasertechnologie ist berührungslos und somit, je nach Situation, auch außerhalb des Gefahrenbereichs. Schwingungsmessungen an rotierenden oder glühenden Objekten können erfolgreich durchgeführt werden. Der Abstand zum Objekt variiert je nach verwendeter Optik und liegt zwischen wenigen mm und mehreren hundert Metern. Wie bei allen laserbasierten Systemen können sich die notwendigen Sicherheitsvorschriften im Umgang mit Laseranwendungen nachteilig auswirken. Auch für die Materialeigenschaften des Messobjektes gibt es Einschränkungen. Eine direkte Messung von transparenten Oberflächen ist nicht ohne weiteres möglich. Bei der Verwendung eines einzelnen Vibrometers ist lediglich eine Punktmessung möglich und somit auch nur die Beobachtung der Schwingung in eine Richtung. Freier Sichtzugang und eine Standortwahl mit nahezu rechtwinkliger Visur auf das Objekt ermöglichen die präzise Schwingungsmessung (POLYTEC 2019). Eine Anwendungsmöglichkeit mittels Laser- Vibrometrie zeigt die Überprüfung der Tragseile an der Deh Cho Brücke in Canada. Durch die berührungslose Schwingungsmessung konnten Schlüsse über die Zugkräfte an den Tragseilen bestimmt werden (SCHMIEDER & OLIVER 2013). EBERT (2016) zeigt den Einsatz der Vibrometrie zur Inspektion von Windenergieanlagen, durch die Erfassung der Rotorblattbewegung zur strukturellen und aerodynamischen Optimierung von Rotorblättern.

Bei der terrestrischen Radarinterferometrie (auch als t-InSAR bezeichnet) wird eine elektromagnetische Welle im Wellenlängenbereich von etwa 1,8 cm (Ku-Band) aktiv gesendet. Diese Wellen werden von der zu messenden Oberfläche reflektiert und vom Empfänger erfasst. Dabei wird das Messprinzip des InSAR genutzt um Bewegungen oder Änderung zu bestimmen. Phasenunterschiede bei der Erfassung des zurückkommenden Signals werden mit zwei nebeneinander angeordneten Antennen erfasst. Aus diesen Phasenunterschieden kann die Änderung am Objekt berechnet werden. Diese Messsysteme können üblicherweise in statisch oder dynamisch betrieben werden. Speziell die dynamische Überwachung

eignet sich für die Schwingungsmessung. Wichtig für die Messung ist, dass die verwendete Signalstärke höher ist als das Umgebungsrauschen. Um gute Messergebnisse zu gewährleisten kann es notwendig sein Reflektoren (corner reflectors) zu installieren. Je nach dem zu beobachteten Objekt ist jedoch auch die Nutzung von bereits am Bauwerk befindlichen Radarreflektoren („Cornercubes“) möglich, vgl. Abbildung 2. Bei der Wahl des Standpunktes ist dieser entsprechend der zu erwartenden Schwingungsrichtung zu wählen, d.h. die Schwingung wird in Blickrichtung beobachtet. Wahlweise eingebaute Beschleunigungssensoren unterdrücken die selbstinduzierten Vibrationen die vom Radar ausgehen, umso den Einfluss zu minimieren oder vollständig zu unterdrücken.

Die hochgenaue Bestimmung von Bewegungen oder Änderungen wurden durch PIERACINI ET AL. (2006), RÖDELSPERGER (2011), RIEDEL & LEHMANN (2012), NEITZEL ET AL. (2012) und CASTAGNETTI ET AL. (2019) nachgewiesen. Vorteilhaft ist hier die kurze Beobachtungszeit, die hohen Abtastraten und die Genauigkeit im Sub-Millimeterbereich. Eine flächenhafte Erfassung ermöglicht zusätzlich eine gleichzeitige Analyse von Verformung und Schwingungsverhalten (LEHMANN 2015).



**Abbildung 2:** Radarreflektor für das Langzeitmonitoring in der Umgebung des Hochmoselübergangs (links), Stahlbrückendetail der Honsellbrücke (Frankfurt am Main) mit der Funktion eines Radarreflektors (rechts)

### 3. Anwendungsbeispiel

#### 3.1. Exemplarische Schwingungsmessung mittels modularem Digitalkameratachymeter

Als Anwendungsobjekt für die Schwingungsbeobachtung wurde eine über die Lahn führende Stabbogenbrücke gewählt, welche von Personen- und Güterzügen genutzt wird. Sie kann von beiden Seiten aus beobachtet werden und ist über einen Steg der Deutschen Bahn begehbar. Die Brücke befindet sich in Lahnstein und wurde 2019 erstmals bereits mit einem modularem Digitalkameratachymeter auf ihr Ambientes Schwingungs-

verhalten hin untersucht (ALTINBAS ET AL. 2019). Hierbei wurden Eigenfrequenzen und Dämpfungskonstanten aus den Messdaten bestimmt. Diese werden für den Vergleich der Ergebnisse mit Beschleunigungssensoren hinzugezogen. Der Aufbau vor Ort erfolgte mit Instrumentenstandorten in 30 bis 70m Entfernung, siehe Abbildung 3. Durch diesen Abstand können Einflüsse auf das Instrument durch das Schwingen der Brücke ausgeschlossen werden. Gleichzeitig ist jedoch der Abstand so gering wie möglich zu halten, um atmosphärische Einflüsse zu minimieren. Mit dem Instrument wird ein markanter, natürlicher Punkt an lasttragenden Elementen der Brücke anvisiert. Dieser wird im Bild durch einen grauwertgestützten Operator mit Subpixelgenauigkeit in Quasi-Echtzeit gefunden und visualisiert. Gemessen wurden die Schwingungen nach der Anregung durch einen Personen- oder Güterzug. Zeitgleich wurden Daten mittels eines Beschleunigungssensors erfasst. Auch an sonst unzugänglichen Punkten an dem Brückenbogen wurden Punkte auf ihr Schwingverhalten hin beobachtet. Da es bei der Messung der Schwingung zu keiner Streckenmessung kommt, sondern lediglich Richtungswinkel bestimmt werden, müssen diese in räumliche Koordinaten umgerechnet werden. Dies erfolgt durch die vorherige Bestimmung einer ausgleichenden Ebene als Approximation der Bauwerksebene in der sich der zu beobachtenden Punkt befindetet, siehe Abbildung 4. Vor und nach der eigentlichen Messung werden einzelne Punkte am Objekt polar (Winkel und Strecke) aufgenommen. Aus diesen Punkten wird eine ausgleichende Ebene berechnet. Der beobachtete Punkt bewegt sich durch die Anregung des Zuges nahezu auf dieser Ebene. Aus den Richtungsbeobachtungen kann der Schnittpunkt mit der Ebene bestimmt werden. Die Berechnung der ausgleichenden Ebene als auch die aus den Schnittpunkten resultierenden Koordinaten aus der Schwingungsmessung sind softwareseitig implementiert und erfolgen automatisiert (RAU 2019).

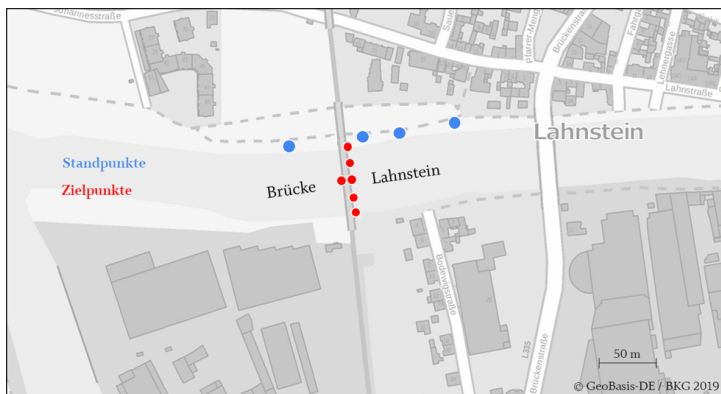


Abbildung 3: Übersicht zu Ziel- und Standpunkten der Messung in Lahnstein

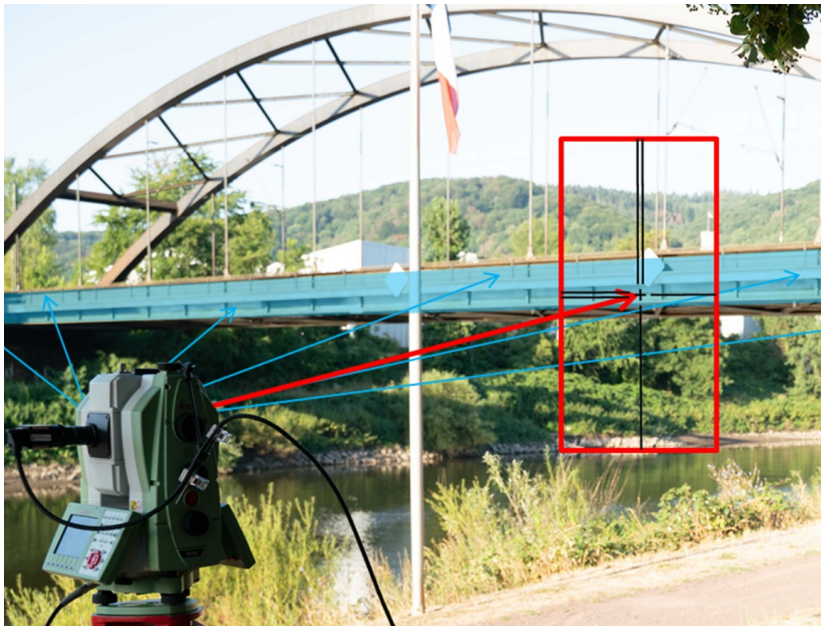


Abbildung 4: Schnittpunktberechnung ausgleichende Ebene (blau) mit virtueller Richtung (rot)

### 3.2. Auswertung und Analyse

Verglichen werden die Messergebnisse vom Beschleunigungssensor G-Link-200 von LORD. Der dreiachsige kabellose Lowcost-Sensor besitzt einen Messbereich von  $\pm 2$  bis  $\pm 40$  g und eine Reichweite bis zu 2km. Der Beschleunigungssensor ist DC-gekoppelt und besitzt eine Bandbreite bis 1KHz. Durch seinen magnetischen Fuß und seine kompakte Größe von nur 46,6mm x 43mm x 44mm, ist er handlich und, im vorliegenden Fall einer Stabbogenbrücke mit Stahlträger, einfach zu befestigen.

Das Bestimmen der Eigenfrequenzen basiert auf dem ambienten Fenster (siehe Abbildung 5), d.h. das Ausschwingen der Brücke nach der Anregung durch den Zug. Bei der Frequenzanalyse stellen sich zwei Extrema als Eigenfrequenzen dar. Diese liegen bei 2,051 Hz und bei 2,500 Hz. Insgesamt wurden durch 8 verschiedene Messungen die Frequenzen bestätigt. Einzelne Messungen lassen sich untereinander nur bedingt hinsichtlich der Durchbiegung oder Amplitude vergleichen, da diese abhängig von der Belastung, d. h. des Gewichts des passierenden Zuges, sind (RAU 2019). Die in den Daten erkenntliche Schwebung wird im weiteren Auswerteprozess approximiert und durch gefilterte Messwerte wird die gedämpfte Schwingung modelliert.

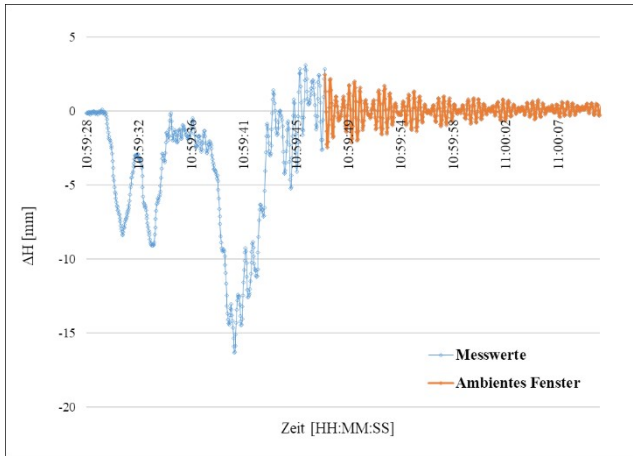


Abbildung 5: Aufgezeichnete Verformungen

Die durch das modulare Digitalkameratachymeter erfassten und berechneten Eigenfrequenzen konnten jedoch nur in zwei von 10 Messungen durch den Beschleunigungssensor bestätigt werden. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der berechneten Eigenfrequenzen aus den zwei unterschiedlichen Messverfahren. Im Gegensatz zur Amplitude haben die Frequenz und Dämpfungskonstante der Schwingung keinen direkten Bezug zu der metrischen Einheit oder zur Einheit der Beschleunigungen. Eine Integration oder Differentiation ist zum Vergleich dieser Ergebnisse nicht notwendig.

	Berechnete Eigenfrequenz [Hz]	Standardabweichung [Hz]
Beschleunigungssensor G-Link – 200 Wireless Accelerometer	2,486	0,032
Modulare Digitalkameratachymeter (MS50 mit UI-3080CP-M)	2,500	0,105

Tabelle 1: Ergebnisse der Schwingungsmessungen. Berechnete Eigenfrequenzen aus unterschiedlichen Messungen an der Brücke

Die Qualität der Ergebnisse hängt im Wesentlichen von der Standpunktwahl und den atmosphärischen Einflüssen ab. Sowohl die Taktrate als die Zielpunktdefinition sind im Vorfeld qualifiziert zu wählen, da sie ebenfalls die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen.



Durch sinnvoll gewählte Standpunkte sowie kontrastreiche Ziele am Bauwerk ist es möglich, die Standardabweichung der Messwerte in der Ruhephase der Brücke, also ohne Anregung durch einen Zug, so zu begrenzen, dass diese innerhalb der Messgenauigkeit des Instrumentes liegen. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass sich das optische Messsystem mittels modularem Digitalkameratachymeter durchaus zur Überwachung von Bauwerken eignet. Dabei zeichnet es sich vor allem durch die hohe Mobilität und schnelle Einsetzbarkeit aus. Nachteilig ist die Abhängigkeit von Wetter und Lichtverhältnissen.

### 3.3. Ansätze zur Integrierung der Messergebnisse in ein Bestands-BIM

BIM bietet die Möglichkeit der Bereitstellung großer Datenmengen, der Prozessintegration und der Dokumentation vermessungstechnischer Leistungen (KADEN ET AL. 2019). Das Structural Health Monitoring (SHM) ist eine kontinuierliche oder periodische und automatisierte Methode zur Bestimmung und Überwachung des Zustandes eines Bauwerks. Eine Verbindung dieser beiden Methoden ermöglicht eine interdisziplinäre Auswertung verschiedener Informationen über den aktuellen Zustand des Objektes innerhalb einer Plattform. Simultan können Daten aus unterschiedlichen Quellen, von unterschiedlichen Datentypen, gemeinsam analysiert und visualisiert werden. Die frühzeitige Erkennung möglicher Zustandsänderungen der Bausubstanz hat insbesondere im Hinblick auf die Nachhaltigkeit der Lebens- und Nutzungsdauer des Objektes, von Bauteilen und Bauteilschichten eine besondere Bedeutung. Eine effiziente Zugänglichkeit von SHM-Daten kann durch Integration dieser in die Bauwerksdatenmodellierung erfolgen.

Die Vorgehensweise zur Integration von SHM-Daten wird beispielhaft für ein Bauwerksdatenmodell mit der Software Autodesk Revit und dem Plug-In Keynote Manager (VALINEJADSHOUBI ET AL. 2017) sowie des Revit-Plug-Ins BIM One wie in DEL GROSSO ET AL. (2017) beschrieben erläutert. Revit ist ein Softwarepaket von Autodesk zur bauteilorientierten Erstellung von Bauwerksmodellen in 2D sowie in 3D. Änderungen an einzelnen Bauteilen oder im Bauplanungsprozess werden automatisch für ein ganzes Projekt aktualisiert, sodass alle Daten und Pläne konsistent bleiben.

Mit dem Keynote Manager (kostenpflichtig) können weitere Informationen zum Bauwerk gespeichert, einfach verwaltet und mit externen Dateien verknüpft werden. SHM-Daten müssen einem Bauteil zugeordnet werden, um diese in einem Bauwerksdatenmodell speichern zu können. Um eine solche Zuordnung zu ermöglichen, muss bekannt sein, an welchem Bauteil die Daten aufgenommen wurden. Am genauesten kann diese Zuordnung erfolgen, wenn sowohl Bauwerksdatenmodell als auch SHM-Informationen in einem übergeordneten Koordinatensystem georeferenziert sind. Das modulare Digitalkameratachymeter kann durch eine vor der Messung durchgeführte Stationierung direkt Koordinaten im übergeordneten Koordinatensystem liefern. Die Georeferenzierung der SHM-Informationen sowie des Bauwerksdatenmodells ermöglicht das lagerichtige Einfügen der Daten im Bauwerksdatenmodell. Wenn SHM mit einem Beschleunigungssensor durchgeführt wurde, ist es möglich, ein Modell des Beschleunigungssensors als Bauteil im Bauwerksdatenmodell zu integrieren und die SHM-Messung diesem Bauteil zuzuordnen (VALINEJADSHOUBI ET AL. 2017). Da mit dem modularen Digitalkameratachymeter jedoch nur ein kleiner Teil

eines Bauteils beobachtet wird, ist es zweckmäßig ein passendes Bauteil an der beobachteten Stelle im Bauwerksdatenmodell einzufügen. Im vorliegenden Fall wurde ein Quader erstellt. Durch die bekannten 3D-Koordinaten kann der Quader als Bauteil an der korrekten Stelle im Bauwerksdatenmodell positioniert werden. Die anschließende Integration der SHM-Informationen erfolgt über eine Verknüpfung des Quaders mit den SHM-Dateien. Über sogenannte Bauelementschlüssel (Keynotes) kann jedes beim SHM beobachtete Ziel als Bauelement in Revit geladen und innerhalb der Baumstruktur gelistet werden. In Abbildung 6 wird die Integration der Messwerte innerhalb des BIM mit der vom Keynote Manager implementierten Baumstruktur dargestellt. Die jeweils von den Zielen abgehenden Knotenpunkte beschreiben den Standpunkt, von dem aus die SHM-Messung erfolgte. Da jeder Knotenpunkt einen individuellen Namen erhalten muss, besteht der Name aus Ziel- und Standpunktname. Diesem zu einer einzelnen Messung gehörenden Knoten werden Verknüpfungen zu den Auswertungsdateien der jeweiligen SHM-Messung zugeordnet. Die Auswertedateien können dabei variabel und bauwerksabhängig gewählt werden. Eine Erweiterung ist jederzeit möglich.

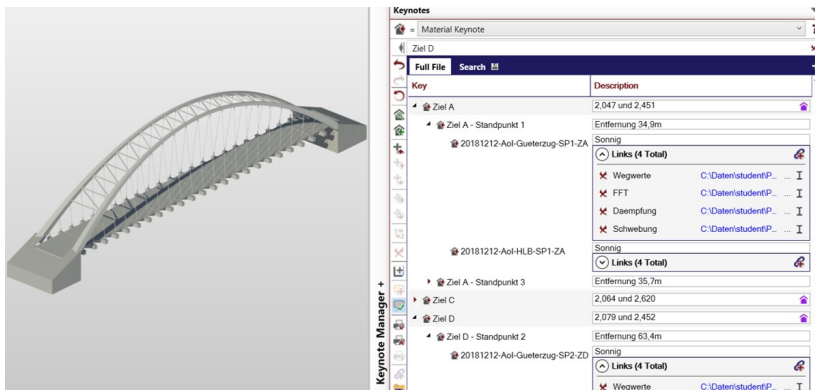


Abbildung 6: Integration von Messwerten in ein BIM mittels Keynotes

BIM One bietet über ein Plug-In die Möglichkeit des Exportes und Importes von Excel Dateien. Hierfür ist es erforderlich die notwendige Parameterstruktur zu erstellen. Gemeinsam genutzte Parameter müssen über eine neue Gruppe z.B. "Sensoren" implementiert werden. Familien innerhalb von Revit können dann diese Parameter zugewiesen werden. Auch in diesem Fall wurden innerhalb des Bauwerkmodells Quader als eigenständige Familie eingefügt, welche die Zuordnung der Daten lagerichtig ermöglicht. Über die Verknüpfung von Bauteillisten kann dann der Export und Import von SHM-Daten erfolgen. Änderungen der SHM-Daten innerhalb der Exceltabelle werden von Revit automatisch aktualisiert.

## 4. Diskussion

Die hier vorgestellten Systeme zeigen das große Potential der optischen Schwingungsmessung. Zum exemplarischen Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren können adäquate Instrumente anhand einiger Kenngrößen gegenübergestellt werden. Jeweils ein erprobtes System zu Hochgeschwindigkeitskamera - Systeme (VIC-3D 8 System), Modulare Digitalkameratachymeter (MS50 mit UI-3080CP-M), Terrestrischer Laserscanner (Z+F PROFILER® 9012), Vibrometer (Polytec RSV-150 Remote Sensing Vibrometer) und Radarinterferometrie (IBIS-FS) werden im folgenden Absatz betrachtet.

Die für die Erfassung von üblichen Bewegungen von Bauwerken notwendige Abtastrate von ca. 10-100Hz wird dabei von allen Systemen erfüllt. Ebenso verhält es sich mit der notwendigen Auflösung, wobei dieser bei optischen Systemen immer Abhängig ist vom Abstand zum Objekt. Der für die Erfassung sinnvolle Abstand von 5-100m erweist sich als unproblematisch für die verschiedenen Systeme. Der größtmögliche Abstand wird dabei vom Radar mit bis zu 1km beziffert. Deutliche Unterschiede zeigen sich bei der Betrachtung des Gewichtes. Hier variieren die Zahlen zwischen wenigen Kilogramm bis hin zu 32kg für das Radarinterferometer IBIS-FS. Das Kamerabasierte-System zeichnen sich durch das geringe Gewicht und die damit verbundene erhöhte Mobilität aus. Gemeinsam haben alle den großen Vorteil non-invasiv zu sein, mit der Option auch außerhalb der Gefahrenbereiche agieren zu können. Schwer zugängliche Bereiche bestehender Bauwerke können so auf ihr Verhalten hin zumindest in Teilbereichen des SHM beobachtet und erfasst werden.

Kostenintensive Installationen von Messtechnik und Sensorik am Bauwerk entfällt. Die auf Laserverwendung basierenden Systeme, Laserscanner und Vibrometrie, und das Radarsystem punkten dabei im Vergleich zu den Kamerasystemen durch die Unabhängigkeit von den äußeren Lichtverhältnissen. Im Gegenzug sind dafür Sicherheitsvorschriften für die Anwendung eines Lasers zu beachten bzw. ist beim Radar die Geometrie des Objektes ausschlaggebend für den Messerfolg. Das Vibrometer und das modulare Digitalkameratachymeter sind (bei der Verwendung nur eines Instrumentes) beschränkt auf die Messung eines diskreten Punktes am Bauwerk, wohingegen Laserscanner, Radar und Industriekameras flächendeckend arbeiten können.

Das hier ausführlicher vorgestellte Messsystem mittels modularem Digitalkameratachymeter bietet die Möglichkeit, die erfassten Messwerte direkt zu georeferenzieren. Berührungslos kann ein beliebiger diskreter Punkt, sofern freie Sicht und ausreichende Beleuchtung vorhanden sind, in 1D/2D erfasst werden. Durch die Verwendung zweier modularer Digitalkameratachymeter mit zeitlicher Synchronisation kann auch die hochgenaue 3D-Erfassung einer Schwingung durch den Vorwärtsschnitt realisiert werden. In *ATORF ET AL. (2019)* wird der erfolgreiche Einsatz zweier modularer Kameratachymeter zur berührungslosen Positionsbestimmung nachgewiesen. Ebenso ist, durch das Koppeln mehrerer Tachymeter mit zeitlicher Synchronisation, die zeitgleiche Beobachtung mehrerer Punkte an einem Bauwerk möglich. In diesem Fall ist der Messaufbau jedoch sehr aufwendig und Instrumenten-intensiv. Beides gilt es noch für Anwendungsbeispiele zu erproben. Ebenso gilt es noch, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit vom Dämpfungsverhalten und der Amplitude genauer zu untersuchen.

Digitale Kameratachymeter gehören heute schon in vielen Vermessungsbüros zur Standardausrüstung, so dass eine einfache Erweiterung um eine Industriekamera plus Auswertesoftware eine attraktive Perspektive zur Neuanschaffung eines anderen Systems bietet. Zudem erleichtert die unkomplizierte Georeferenzierung deutlich die weitere Verarbeitung in digitalen 3D-Modellen, wie z.B. in einem BIM.

Die Integrierung von SHM-Daten in eine Bestand-BIM wurde in ersten Ansätzen mit den erfassten Daten aus dem Anwendungsbeispiel in Lahnstein getestet und anhand zweier Plug-Ins mit dem Modell verknüpft. Beide vorgestellten Vorgehensweisen sind aufwendig und benötigen die Zuweisung zu einem Bauteil oder Sensor innerhalb des Modells. Die Zuweisung zu einem Bauteil kann je nach Situation die falsche örtliche Positionierung bedeuten. Die Erzeugung eines zusätzlichen Bauteils, welches in der Realität nicht am Bauwerk existiert, erweitert das BIM unzweckmäßig. Beide Wege sind nicht optimiert für den Anwendungsfall des SHM und den damit verbundenen relevanten Daten. In naher Zukunft wird die Entwicklung des BIM sich auch mit dieser Problematik befassen müssen, so dass die Integration von SHM-Daten wirtschaftlich und adäquat möglich ist.

## Literatur

- ALLEMAND, J.; SHORTIS, M. R.; ELMOUTTIE, M. K. (2018): High Speed Viedometric Monitoring Of Rock Breakage. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2, S. 17–24. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-17-2018.
- ALTINBAS, TAMER; KARLA, DANIEL; PLASS, BASTIAN; RAU, LINDA (2019): First steps towards Deep Learning for Optical Structural Health Monitoring. Dokumentation zur Projektarbeit: nicht veröffentlicht.
- ATORF, PHILIPP; HEIDELBERG, ARNO; SCHLÜTER, MARTIN; ZSCHESCHE, KIRA (2019): Berührungslose Positionsbestimmung von spiegelnden Kugeln mit Methoden des maschinellen Sehens. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 144 (5), S. 317–322. DOI: 10.12902/zfv-0268-2019.
- CASTAGNETTI, CRISTINA; BASSOLI, ELISA; VINCENZI, LORIS; MANCINI, FRANCESCO (2019): Dynamic Assessment of Masonry Towers Based on Terrestrial Radar Interferometer and Accelerometers. In: Sensors (Basel, Switzerland) 19 (6). DOI: 10.3390/s19061319.
- DEL GROSSO, ANDREA; BASSO, PAOLO; RUFFINI, LORENZO; FIGINI, FABIO; CADEMARTORI, MARCELLO (2017): Infrastructure management integrating SHM and BIM procedures. In: SMAR 2017 - Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Zürich, Switzerland.
- EBERT, R. (2016): Laser vibrometry for wind turbines inspection. In: Tzuyang Yu, Andrew L. Gyekenyesi, Peter J. Shull und H. Felix Wu (Hg.): Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2016, Bd. 9804. International Society for Optics and Photonics: SPIE, S. 126–131.
- EHRHART, MATTHIAS; KALENJUK, SLAVEN; LIENHART, WERNER (2017): Monitoring of bridge vibrations with image-assisted total stations. In: SMAR 2017 - Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Zürich, Switzerland.
- GUILLAUME, S.; CLERC, J.; LEYDER, C.; RAY, J.; KISTLER, M. (2016): Contribution of the Image-Assisted Theodolite System QDaedalus to Geodetic Static and Dynamic Deformation Monitoring. In: International Federation of Surveyors, FIG (Hg.): Conference

- and Seminar Proceedings: 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). Copenhagen: International Federation of Surveyors, FIG.
- KADEN, ROBERT; CLEMEN, CHRISTIAN; SEUSS, ROBERT; BLANKENBACH, JÖRG; EICHHORN, ANDREAS; DONAUBAUER, ANDREAS ET AL. (HG.) (2019): Leitfaden Geodäsie und BIM - Version 2.0. Online verfügbar unter <https://www.dvw.de/BIM-Leitfaden.pdf>. Lehmann, Martin (2015): Schwingungen von Ingenieurbauwerken - Bestimmung mittels terrestrischer Radarinterferometrie. In: Tagungsband GeoMonitoring 2015.
- LUHMANN, THOMAS (2017): Nahbereichsphotogrammetrie. 4. Aufl.: Wichmann. Online verfügbar unter [www.nahbereichsphotogrammetrie.de](http://www.nahbereichsphotogrammetrie.de).
- NEITZEL, F.; NIEMEIER, W.; WEISBRICH, S.; LEHMANN, M. (2012): GBSAR, TLS und Beschleunigungsmessungen für Schwingungsuntersuchungen. In: DVW e. V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (Hg.): Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. DVW-Arbeitskreis 4 »Ingenieurgeodäsie«, DVW-Schriftenreihe Band 68/2012. Weimar, 25. und 26. September 2012: Wissner-Verlag (68), S. 121–148.
- NEITZEL, FRANK; SCHWARZ, WILLFRIED (2017): Schwingungsuntersuchungen. In: Willfried Schwarz (Hg.): Ingenieurgeodäsie. Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel: Springer-Verlag GmbH Deutschland, S. 463–506. Online verfügbar unter [https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_28).
- PIERACCINI, MASSIMILIANO; FRATINI, MATTEO; PARRINI, FILIPPO; ATZENI, CARLO (2006): Coherent radar for measuring dynamic and static deformations of architectural structures. In: IG Symposium, Baden, May 22-24.
- POLYTEC (2019): RSV-150 Remote Sensing Vibrometer. Detektion von Schwingungen über große Distanzen. Produktbroschüre. Hg. v. Polytec. Online verfügbar unter [https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM\\_PB\\_RSV-150\\_D\\_42487.pdf](https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_PB_RSV-150_D_42487.pdf), zuletzt aktualisiert am 2018/03.
- RAU, LINDA (2019): Masterthesis: Integration von SHM in BIM. Mainz: nicht veröffentlicht.
- RIEDEL, BJÖRN & LEHMANN, MARTIN (2012): Erfassung von lastbedingten Veränderungen an Brückenbauwerken mittels terrestrischer Radarinterferometrie. In: Marc-Oliver Löwner, Florian Hillen, Ralf Wohlfahrt (Hg.): Konferenzband. Geoinformatik 2012 - „Mobilität und Umwelt“. Braunschweig, 28.-30.03.2012.
- RÖDELSPERGER, SABINE (2011): Real-time processing of ground based synthetic aperture radar (GB-SAR) measurements. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2011. Hannover, Darmstadt: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Techn. Univ. Geodätisches Inst (Schriftenreihe / Fachrichtung Geodäsie, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Technische Universität Darmstadt, 33).
- SCHILL, FLORIAN & EICHHORN, ANDREAS (2019): Profilschanning bei Belastungsversuchen an einer Mauerwerksbrücke. In: Hanke, K. und Weinold, T. ((Hg.): 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019. Berlin, Offenbach: Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH.
- SCHLÜTER, MARTIN & HAUTH, STEFAN (2015): Modulare Digitalkameratachymetrie. Schlussbericht zu Nr. 6.6 BNBest-BMBF: Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover (TIB/UB).

- SCHMIEDER, MARCUS & OLIVER, DAVID (2013): Messung von Zugkräften an Tragseilen. Kein Drahtseilakt. In: Polytec GmbH (Hg.): InFocus - Magazin für Optische Messsysteme von Polytec, Ausgabe 01/2013. Waldbronn, S. 10–11. Online verfügbar unter [https://issuu.com/polytecgbmh/docs/om\\_infocus\\_2013\\_2000\\_d](https://issuu.com/polytecgbmh/docs/om_infocus_2013_2000_d), zuletzt geprüft am 19.12.2019.
- VALINEJADSHOUBI, MOJTABA; BAGCHI, ASHUTOSH; MOSELHI, OSAMA (2017): Managing Structural Health Monitoring Data Using Building Information Modelling. In: SMAR 2017 - Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Zürich, Switzerland.
- VEENEGEREERTS, H. & KUTTERER, K. (2007): Analyse der Bewegung von Windenergieanlagen aus dem Vergleich zweier Aufnahmeverfahren terrestrischer Laserscanner. In: F. K. Brunner (Hg.): Ingenieurvermessung 07 – Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs. Wichmann, S. 335–340.
- WAGNER, ANDREAS (2017): New Geodetic Monitoring Approaches using Image Assisted Total Stations. München: Lehrstuhl für Geodäsie.

## **Kontakt**

KIRA ZSCHIESCHE

MARTIN SCHLÜTER

Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik  
Hochschule Mainz - University of Applied Sciences  
Lucy-Hillebrand-Straße 2  
55128 Mainz

LINDA RAU

Hochschule RheinMain  
Unter den Eichen 5  
65195 Wiesbaden  
Linda.rau@hs-rm.de