Die aktuellen Vorgehensweisen bei der Bauwerksprüfung und der Dokumentation sind heute nicht mehr zeitgemäß

Drohnen und Smartphones sind die neuen Werkzeuge für Bauwerksüberwachungen und die BIM-Modellierung

Ist die aktuelle Bauwerksprüfung in Zeiten von Big-Data noch zeitgemäß? Das ist die zentrale Frage, die im folgenden Beitrag mitten aus der Praxis heraus schlüssig beantwortet wird. Er zeigt ganz neue Methoden der Bauwerksprüfung und des Monitorings und veranschaulicht mit vielen Beispielen den Einsatz von Drohnen und Smartphones. Sie zeigen sehr deutlich, dass diese neuen Werkzeuge und Verfahren ein großes, zukunftsweisendes Potential besitzen; und dass sie die mit BIM begonnene lückenlose und kontinuierliche Erfassung und Bewertung von Bauwerken vorantreiben, weil sie verlässliche Datensätze und digitale Modelle über den Ist-Zustand erzeugen, die als Referenzwerte für Bauwerksprüfungen verwendet werden können. Dadurch lassen sich Änderungen zielgerichteter und frühzeitiger detektieren. Diese digitale Erfassung führt auch zu einer präzisen Digitalisierung von Bestandsbauwerken und bietet damit einen weiteren ingeniösen Eingang in das Building-Information-Modeling.

M.Sc. Thomas Hertle
studierte Bauingenieurwesen an der TU München und ist seit 2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Baustatik der Universität der Bundeswehr München

M.Sc. Maximilian Garsch
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und kommissarischer wissenschaftlicher Leiter des Labors für Ingenieurinformatik an der Professur für Baustatik an der Universität der Bundeswehr München und Juniormitglied des Forschungszentrums RISK

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken*
ist Inhaber der Professur für Baustatik an der Universität der Bundeswehr München, Vorsitzender der Forschungsvereinigung Baustatik-Baupraxis, Gründer und Sprecher des Forschungszentrums Risiko, Infrastruktur, Sicherheit und Konflikt (RISK), Gründungspräsident der International Association of Protective Structures, Beratender Ingenieur VBI, Prüfingenieur VPI, Präsident der bayerischen Ingenieurekammer Bau, Vizepräsident des Deutschen Instituts für Prüfung und Überwachung (DPÜ) und Geschäftsführender Gesellschafter der Ingenieurgesellschaften AJG und MJG

**Die Autoren sind an der vorliegenden Arbeit zu gleichen Teilen beteiligt*

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Bundesrepublik Deutschland hat sowohl einen alternden Brückenbestand als auch einen zunehmenden Bedarf an neuen Brücken – es gibt derzeit 39.621 Brücken im Bundesfernstraßennetz, rund ein Achtel davon ist nach der Brückenstatistik 2017 der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in einem „nicht ausreichenden" oder in einem „ungenügenden Zustand". All' diese Brücken müssen überprüft und überwacht werden.

Die heutige Brückenprüfung nach DIN 1076 geht auf die *Richtlinie für die Überwachung und Prüfung eiserner Straßenbrücken* vom August 1930 zurück, die 1933 durch die DIN 1077 *Richtlinie für die Überwachung und Prüfung massiver Straßenbrücken* ergänzt worden ist. Dies ist jedoch erst der normative Beginn der Bauwerksprüfung in Deutschland. Denn schon dem heutigen Wahrzeichen der Stadt Regensburg, der Steinernen Brücke **(Abb. 1)**, die in den Jahren 1135 bis 1146 erbaut worden ist und somit zu den ältesten mittelalterlichen Steinbrücken Europas zählt, wurde bereits zur damaligen Zeit eine eigene Verwaltung zugeteilt [1]. Mit den Einnahmen aus dem Brückenzoll sollten zielgerichtet die Wartung und die Erhaltung der Brücke sichergestellt werden.

Wie am Beispiel der Steinernen Brücke ersichtlich wird, gibt es erste dokumentierte Bauwerksprüfungen, -inspektionen und -wartungen bereits seit Beginn des zwölften Jahrhunderts. Über die Zeitläufte haben sich, neben der Bauweise, den Materialien und der Normung, auch die Prüf- und Überwachungsmethoden weiterentwickelt. So wurden die DIN 1076 und die DIN 1077 über die Jahre angepasst und verbessert. Die zeitgemäßen Anpassungen spiegeln sich unter anderem in modernen Prüfmethoden wider. Beispielsweise ergänzen beziehungsweise ersetzen automatisierte Prüfverfahren mittels Laserscanning in den letzten Jahren die klassischen Vermessungswerkzeuge. Mit Monitoring-Systemen, die sowohl bei Bestands- als auch bei Neubauten verwendet werden können („Intelligente" Brücken/Bauwerke) ([2], [3], [4], [5]), und neuen Verfahren, wie der Erkundung durch instrumentierte unbemannte Fluggeräte (Drohnen), sowie dem Erstellen von geometrischen 3D-Modellen mittels Photogrammmetrie (PG), gibt es inzwischen weitere Werkzeuge, die bei der Bauwerksprüfung verwendet werden können und sollten. Die Digitalisierung umfassender Prozesse, wie zum Beispiel Datenbanken und Building Information Modeling (BIM), wird vorrangig bei Neubauten eingesetzt. Hierdurch sind völlig neue Planungsprozesse möglich. Um die Nachhaltigkeit der Infrastruktur zu sichern, ist es nötig, diese Entwicklung auf die Bestandsinfrastruktur zu erweitern. Der vorliegende Artikel stellt unter anderem die Technologie und die Anwendungsmöglichkeiten von neuen Werkzeugen vor, wie zum Beispiel instrumentierte unbemannte Fluggeräte oder Schwingungsmesssysteme. Er möchte damit auch einen Beitrag zur notwendigen, vermehrten Anwendung der Digitalisierung im Bauwesen leisten.

https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Regensburg_-_Steinerne_Bruecke_ohne_Dom.jpg

Abb. 1: Steinerne Brücke über die Donau in Regensburg

1.2 Bauwerksprüfung – Stand der Technik

1.2.1 Aktuelle Normung und Richtlinien

Um die Einsatzmöglichkeiten von instrumentierten unbemannten Flugsystemen und mobilen Geräten, wie zum Beispiel Smartphones, bei der Bauwerksprüfung und dem Bauwerksmonitoring aufzuzeigen, müssen zunächst die aktuellen Richtlinien recherchiert und analysiert werden [6]. Die für diesen Beitrag wichtigsten Dokumente werden im Folgenden aufgelistet und ihre für das hier behandelte Thema wichtigsten Inhalte dargestellt.

Es handelt sich um

■ Die DIN 1076 *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung* [7]; sie beschreibt ein systematisches Verfahren, mit dessen Hilfe Bestandsbauwerke hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit mittels definierter Kriterien bewertet werden. Hierbei wird der Zustand eines Ingenieurbauwerkes in statischer und konstruktiver Hinsicht wiederkehrend beurteilt und – zum Beispiel – mit dem Ziel dokumentiert, etwaige schleichende Ermüdungs- oder Schadensprozesse frühzeitig feststellen zu können. Die DIN 1076 ist das grundlegende Dokument des Qualitätsmanagements der Bauwerkserhaltung von Ingenieurbauwerken, und sie ist die Grundlage für die Entscheidung über Ertüchtigungsmaßnahmen oder über Ersatz-Neubauten. Sie zählt zu den *Allgemein anerkannten Regeln der Technik*.

■ Die *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten* (RI-ERH-ING) [8]; zu ihnen zählen:

– die Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF) [9],
– der Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA) [10],
– die Richtlinien zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Ertüchtigungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ) [11] und
– die Richtlinie für die Erhaltung des Korrosionsschutzes von Stahlbauten (RI-ERH-KOR) [12].

Für das hier behandelte Thema des Einsatzes von instrumentierten Drohnen und mobilen Geräten, wie Smartphones und Tablets, zur Bauwerksbeobachtung, sind die RI-EBW-PRÜF sowie die OSA heranzuziehen.

Im Kapitel 10 der RI-EBW-PRÜF (Abschnitt 4: *Einsatz von automatisierten bzw. visuellen Prüfverfahren*) werden bereits Verfahren beschrieben, die für die präzise Schadensdetektion geeignet sind und die von automatisierten, beziehungsweise teilautomatisierten Systemen durchgeführt werden. Ihre Nutzung ermöglicht insbesondere eine Verkürzung der Prüfzeiten und eine Verringerung der Verkehrsbeschränkungen. Deshalb sind sie von besonderer Bedeutung.

Der Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA) beschreibt die Vorgehensweise und die Verfahren, die für die zerstörungsfreie, zerstörungsarme und zerstörende Bauwerksprüfung verwendet werden können, und er beschreibt die Anwendungsgrenzen dieser Verfahren.

Des Weiteren existieren die *Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten* (ASB-ING) [13], sowie die *Richtlinie für die bauliche Durchbildung und Ausstattung von Brücken zur Überwachung, Prüfung und Erhaltung* (RBA-BRÜ) [14]. Da diese Regelwerke keinen direkten Bezug zu dem hier behandelten Thema haben, werden sie im Folgenden nicht weiter behandelt.

1.2.2 Bauwerksprüfung nach DIN 1076

Die regelmäßig wiederkehrende Prüfung und Überwachung von Bauwerken ist die wesentliche Grundlage für die Ermittlung von notwendigen Investitionen und Instandsetzungsmaßnahmen sowie für die Entscheidung über die Notwendigkeit eines Ersatz-Neubaus. Die hierbei zu erbringenden Ingenieurleistungen sind in der DIN 1076 [7] aufgeführt. Sie regelt und beschreibt unterschiedliche Arten der Bauwerksprüfung. Die Bauwerksprüfungen werden wie folgt unterschieden.

■ Hauptprüfung

Bei der Hauptprüfung sind sämtliche Bauwerksteile handnah zu prüfen. Hierfür bedarf es gegebenenfalls der Nutzung von Gerüsten, Hebebühnen etc. und des Einsatzes von Industriekletterern. Die Hauptprüfung findet alle sechs Jahre statt.

■ Einfache Prüfung

Die einfache Prüfung gemäß DIN 1076 Abschnitt 5.3 ist eine *intensive, erweiterte Sichtprüfung*. Hierbei soll, soweit wie möglich, auf die Hinzunahme von Gerätschaften verzichtet werden, die die Nutzung der Brücke einschränken. Die einfache Prüfung wird drei Jahre nach jeder Hauptprüfung durchgeführt.

■ Prüfung aus besonderem Anlass
Eine Prüfung aus besonderem Anlass (Sonderprüfung) muss nach Ereignissen durchgeführt werden, die den Zustand des Ingenieurbauwerkes beeinflussen können. Das gilt zum Beispiel für Unfälle, Anprall oder Hochwasser.

■ Prüfung nach besonderen Vorschriften
Anlagen, die für die Nutzung des Bauwerkes benötigt werden, müssen gemäß ihren jeweiligen, anlagenspezifischen Prüfzyklen überprüft werden. Der Umfang dieser Prüfung beschränkt sich auf die jeweilige Anlage.

■ Besichtigung
In den Jahren, in denen keine Hauptprüfung oder keine einfache Prüfung stattfindet, wird die Besichtigung (Sichtprüfung) durchgeführt. Das Bauwerk wird hierbei visuell von der Verkehrsebene oder vom Geländeniveau aus besichtigt.

■ Laufende Beobachtung
Die laufende Beobachtung ist eine vierteljährliche Überwachung der Verkehrswege hinsichtlich der Verkehrssicherheit.

1.2.3 Bauwerksprüfung – Monitoring
Werden bei einer Sichtprüfung Mängel oder Schäden festgestellt, kann im Zuge der anschließenden handnahen Prüfung (DIN 1076, RI-EBW-PRÜF) ein Monitoring-System zum Einsatz kommen. In der momentanen Praxis handelt es sich hierbei in der Regel um ein schadensbezogenes Beobachtungssystem. Welches System dabei zum Einsatz kommt, ist abhängig von den zu untersuchenden physikalischen Größen. Für diese physikalischen Größen wird in der Regel ein Grenzwert festgelegt. Wird dieser Grenzwert überschritten, dann kann automatisch eine Alarmierung erfolgen, wenn das System dafür ausgelegt ist. Zum Beispiel werden zur Messung der Verzerrungen (Dehnungen, Stauchungen, Schubverzerrungen) sogenannte Dehnmessstreifen (DMS) am Bauwerk angebracht. Mit Hilfe der lokalen DMS-Messungen können, bei Kenntnis der mechanischen Übertragungsfunktionen, globale Verformungen zurückgerechnet werden.

Globale Monitoring-Systeme kommen derzeit in der Regel nur in Frage, wenn das gesamte Tragwerksverhalten von Interesse ist. Dies ist beispielsweise bei erkennbaren Verformungen oder Schwingungen der Fall, die die Gebrauchstauglichkeit einschränken, die aber auch Einfluss auf die Tragfähigkeit haben können. Globale Monitoring-Systeme könnten auch zur Ermittlung weiterer Parameter eingesetzt werden, da beispielsweise Eigenfrequenzen von systemeigenen Parametern wie Steifigkeit und Masse abhängen. Eine Systemidentifizierung im Sinne einer Parameter-Identifizierung (zum Beispiel Dämpfungsmaße) ist durch eine Schwingungsmessung möglich [15].

1.3 Bauwerksprüfung – Stand der Forschung
Die Informationen aus der Bauwerksprüfung werden in Datenbanken (Straßeninformationsbank, SIB) und Bauwerksbüchern eingetragen und somit dokumentiert. Die hinterlegten Daten wurden in der Regel stichprobenartig ermittelt. Sie sind deshalb nur schwer reproduzierbar. Schwer zugängliche Bauwerksteile sind nur mit Spezialgeräten oder aus der Ferne mittels Kamera und Fernglas einsehbar. Dadurch verbleiben Unsicherheiten. Hier bieten instrumentierte Drohnen und globale Monitoring-Systeme neue Möglichkeiten. Automatisierte Flugpläne für Drohnen und globale Monitoring-Systeme stellen die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit einer Bauwerksprüfung sicher. Die Nutzung digitaler Bildbearbeitungsprogramme lässt Rückschlüsse auf die Schadensentwicklung und -ausbreitung zu. Eine besondere Prüfung kann gegebenenfalls automatisch durch ein Überwachungssystem ausgelöst werden, das auf das gesamte Tragwerk ausgelegt ist, dann zum Beispiel, wenn vorab definierte Grenzwerte überschritten werden. Die wiederkehrende Beobachtung von Ingenieurbauwerken nach DIN 1076 im Rahmen der Streckenkontrolle kann von stationären, dauerhaften Monitoring-Systemen unterstützt und teilweise ersetzt werden. Durch die Definition von Grenzwerten, die zum Beispiel signifikante Änderungen bestimmter Tragwerksparameter beschreiben, können Schäden frühzeitig erkannt und identifiziert werden. Dies entspräche dem Einsatz von automatisierten, beziehungsweise visuellen Prüfverfahren nach der RI-EBW-PRÜF. Durch ein derartiges Monitoring könnten sich die Häufigkeit der Prüfungen verringern und die Art der Sichtprüfungen verändern lassen.

Durch eine visuelle Prüfung des Bauwerks mittels einer Drohne lässt sich die handnahe Prüfung zielgerichteter steuern. An schwer zugänglichen Stellen, für deren Inspektion bisher aufwendige Gerätschaften (Gerüste) oder Spezialisten (Industriekletterer) benötigt werden, kann eine instrumentierte Drohne effizient eingesetzt werden. Dies ist vor allem bei großen Bauwerken mit begrenzter Einsicht beziehungsweise begrenztem Zugang von Vorteil. Mit Hilfe von instrumentierten Drohnen kann somit eine Verringerung der benötigten Inspektionszeit am Bauwerk bei einer gleichzeitig größeren Anzahl auswertbarer und vergleichbarer Daten erzielt werden.

Die lückenlose und kontinuierliche Dokumentation eines Bauwerks ist auf Grund der teils stichprobenhaften Verfahren bisher nicht gegeben. Hierunter leidet die Vergleichbarkeit von zeitlich versetzten Prüfungen. Die handnahe Prüfung, die bei der Hauptuntersuchung vorgeschrieben ist, kann durch eine größere Informations- und Datendichte mit Hilfe neuer digitaler Systeme zielgerichteter und effizienter gestaltet werden.

2 Der Einsatz instrumentierter Drohnen bei der Bauwerksprüfung

2.1 Unbemannte Flugsysteme – Drohnen
2.1.1 Allgemeines
Unmanned Aerial Vehicles (UAV) oder Unmanned Aircraft Systems (UAS), beide gemeinhin auch als Drohnen benannt und bekannt, sind ferngesteuerte Fluggeräte. Der Beflug mit einer Drohne wird manuell oder automatisch durchgeführt. Ein manueller Beflug wird von einem menschlichen Piloten mittels Fernsteuerung ausgeführt, oder es findet ein automatischer Beflug statt, bei dem ein vorher programmierter Autopilot steuert.

Die Entwicklung von Drohnen zwischen 1970 und 1980 geht auf militärische Zwecke zurück. In den vergangenen Jahren ist ihre Entwicklung aber so weit vorangeschritten, dass sie auch in vielen zivilen Bereichen eingesetzt werden. Im zivilen Bereich dienen sie hauptsächlich der Aufnahme von Fotos und Videos aus der Luft. Auf diese Weise können zum Beispiel große Flächen, beispielsweise in der Land- und Forstwirtschaft, erfasst und solche Veränderungen entdeckt werden, die vom Boden aus nicht oder nur schlecht erkennbar sind.

2.1.2 Gesetzliche Vorgaben
Die 2017 in Kraft getretene Drohnen-Verordnung setzt den rechtlichen Rahmen für die Anwendung von unbemannten Fluggeräten in Deutschland. Sie ist vom Bundesministerium für Verkehr und digitale

Infrastruktur (BMVI) unter dem Titel *Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten* am 6. April 2017 erlassen worden [16]. Für genauere Informationen sei auf dieses Dokument, wie auch auf einschlägige Plattformen im Internet verwiesen.

2.2 Stand der Forschung

Von Mitte des Jahres 2013 bis Mitte 2015 wurde das Forschungsprojekt *Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken* an der Bauhaus-Universität Weimar bearbeitet. Finanziert mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), sollte das Potential des Einsatzes von instrumentierten unbemannten Fluggeräten für die Zustandsermittlung von Bauwerken untersucht werden [17]. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden verschiedene Einsatzszenarien an Referenzbauwerken auf ihre Tauglichkeit getestet. Hierbei wurden viele Möglichkeiten festgestellt, bisherige Untersuchungstechnologien abzulösen oder effizienter zu gestalten. Darüber hinaus wurde der Einsatz von Drohnen auch in der Denkmalpflege untersucht und ob mit ihnen die Lokalisierung und Erkennung von Schäden möglich ist. Die Gigapixelmodelle, die hierbei entstanden, können, so der Schluss der Forscher in Weimar, für eine sehr sichere visuelle Identifikation von Schäden genutzt werden [18], [19].

Es wurde auch getestet, ob photogrammetrische Modelle zur Lokalisierung und Identifizierung von Verschiebungen und Verformungen verwendet werden können. Hierfür wurde eine Drohne mit einer Digitalkamera instrumentiert, deren Fotodaten für die Photogrammetrie verwendet wurden [20].

Aufbauend auf den visuellen Bewertungen von Fotos wurden auch Bildanalyseverfahren entwickelt, mit deren Hilfe beispielsweise Risse auf Betonoberflächen erkannt und sichtbar gemacht werden können [21], [22].

Derzeitige Forschungsthemen sind auch die Generierung dreidimensionaler Geometriemodelle und ihre Überführung in numerische Modelle für eine strukturmechanische Analyse [23].

2.3 Datenakquisition und Photogrammetrie

2.3.1 Technologien

Zur Datenakquisition können unter anderem Digitalkameras, Camcorder, Multispektral-, Thermalkameras, und Laserscanning-Geräte klassisch verwendet oder an einer Drohne **(Abb. 2)** angebracht werden. Mit ihnen werden unterschiedliche Daten (zum Beispiel Fotodaten) akquiriert.

Drohnen bieten bei der Aufnahme räumlicher Objekte eine weitaus größere Flexibilität als bodengebundene Trägerplattformen. Dadurch werden Daten in gleichbleibender Qualität und vollumfänglich erzeugt. Für die Zustandsermittlung im Rahmen der Bauwerksprüfung und -überwachung können derzeit mit oder ohne Drohnen vier Technologien eingesetzt werden:

- Digitalkameras, Camcorder für Bilder und Videos,
- digitale Multispektral-, Thermalkamera für Bilder und Videos,
- Laserscanner und
- Photogrammetrie für Punktwolken.

Bilder und Videos, die mit Digitalkameras oder Camcordern aufgenommen werden, dokumentieren den Ist-Zustand bildlich. Die Bildqualität sollte sehr hoch sein. Für eine fundierte Zustandsbeurteilung werden vor allem hochauflösende Detailaufnahmen benötigt.

Digitale Multispektral- oder Thermalkameras erzeugen ebenfalls Bilder und Videos, die gegenüber den Aufnahmen mit Digitalkameras oder Camcordern andere Informationen beinhalten. Mittels Thermalbildern können beispielsweise bauphysikalische Problemstellen auf Wärmefluss untersucht werden. Dadurch können zum Beispiel „unsichtbare" Schäden sichtbar gemacht werden.

Ein Laserscanner tastet ein Objekt mit Hilfe eines Laserstrahls rasterartig ab. Der erzeugte Datensatz enthält Informationen über Winkel und Distanzen für alle vom Objekt reflektierende Laserstrahlen. Diese Informationen können mit Hilfe einer Auswertungssoftware in eine Punktwolke umgewandelt werden. Referenzmarken ermöglichen es zudem, die Punktwolken von verschiedenen Messstandorten im Raum zuzuordnen. Auf diese Weise werden Einzelmessungen, die von verschiedenen Standorten durchgeführt wurden, in eine dreidimensionale Punktwolke zusammengeführt.

Die Photogrammetrie ist eine Bildverarbeitungstechnologie, die mit Hilfe vieler unterschiedlicher Fotos vom selben Objekt eine Punktwolke im dreidimensionalen Raum erzeugt. Einzelne Punkte eines Objektes im Raum, die in mehreren Aufnahmen als identisch erkannt werden, werden durch Triangulation ermittelt und zu einer Punktwolke zusammengesetzt. Hierfür werden die Kollinearitätsgleichungen verwendet [24]. Allen ermittelten Punkten kann die Farbinformation aus den Fotos hinterlegt werden. So ist es einfach, farbliche Punktwolken zu generieren. Aufgrund der hohen Dichte der Punkte entsteht eine Punktwolke, die die Oberfläche des aufgenommenen Körpers abbildet. Zusammen mit den Farbinformationen der Punkte entsteht eine Punkt-

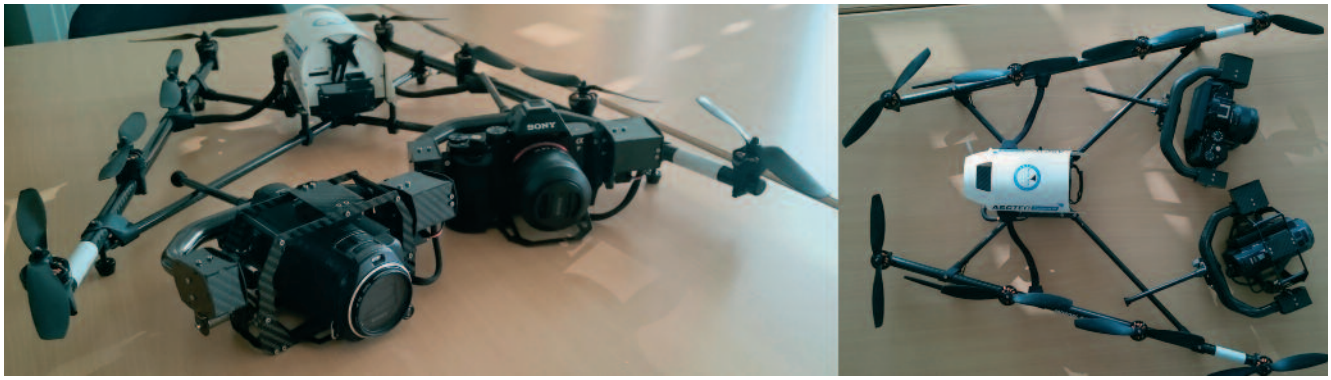

Abb. 2: Dem Labor für Ingenieurinformatik des Instituts für Mechanik und Statik der Universität der Bundeswehr München eigene Drohne „Falcon 8" der Firma Ascending Technologies mit unterschiedlichen Sensoren

wolke mit hoher Detailgenauigkeit und realen Texturen. Deshalb sind Punktwolken für eine Zustandsermittlung besonders geeignet. Die American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) definiert den Prozess der Photogrammetrie als *the art, science, and technology of obtaining reliable information about physical objects and the environment through processes of recording, measuring and interpreting photographic images and patterns of recorded radiant electromagnetic energy and other phenomena* [25]. Tiefergehende Informationen über die Theorie der Photogrammetrie, ihre Anwendungsgrenzen und ihre Einflussparameter können der diesbezüglichen Grundlagenliteratur und weiteren Veröffentlichungen entnommen werden (exemplarisch: [26], [27], [28]). Aktuelle Anwendungsgebiete für die Photogrammetrie sind zum Beispiel der Erhalt und der Wiederaufbau von Denkmälern, die Volumenbestimmung im Erd- und Straßenbau und die Vermessung von Geländeoberflächen, wie zum Beispiel Ausgrabungsstätten. Die Nutzung der Photogrammetrie zur ganzheitlichen Zustandsermittlung ist aktuell im Bauwesen noch nicht weit verbreitet.

2.3.2 Anwendungen in der Praxis

Um die Möglichkeiten der Nutzung und die Tauglichkeit von unbemannten Fluggeräten bei der Zustandsermittlung im Rahmen der Bauwerksprüfung und -überwachung zu untersuchen, haben wir Praxistests an Brücken durchgeführt. Dabei wurde vor allem der Einsatz der Photogrammetrie untersucht. Die Wärmebildtechnologie wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht eingesetzt. Die Untersuchungen und Auswertungen an einigen dieser Referenzbrücken werden im Folgenden dargestellt. Das Fluggerät „Falcon 8" des Labors für Ingenieurinformatik am Institut für Mechanik und Statik der Universität der Bundeswehr München **(Abb. 2**) wurde bei den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen nur mit einer digitalen Fotokamera (Sony Alpha 7R) bestückt. Bei den auch weiter unten geschilderten Untersuchungen an der Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr München und der Fußgängerbrücke Kolbermoor wurden auch Vergleiche mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS) durchgeführt. Bei diesem TLS handelt es sich um das Modell Leica Scanstation C10.

■ Thalkirchner Brücke

Bei der Thalkirchner Brücke in München **(Abb. 3)** handelt es sich um eine Straßenbrücke mit einer Gesamtlänge von 197 Meter. Sie wurde zwischen 1989 und 1991 erbaut und hat 13 Felder, die größte Stützweite beträgt 13,4 Meter. Da die Tragstruktur aus einem räumlichen Holzfachwerk mit vielen Einzelstäben besteht, kann an dieser Brücke die Leistungsfähigkeit der Photogrammetrie erforscht werden. Um diese Untersuchung auf diese Technologie zu fokussieren, wurde die Brücke nur von unten mit einer digitalen Handkamera (Sony RX100) aufgenommen. Dafür reichte es, die Erfassung auf zwei Felder zu beschränken. Die vielen Einzelstäbe, die sich bei den Aufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven gegenseitig verschatten und verbergen, stellen eine große Herausforderung für die photogrammetrische Auswertung dar, für die 589 Fotos herangezogen wurden (243 Aufnahmen für Feld 1 und 346 Aufnahmen für Feld 2).

Die aus den 243 Fotos des ersten Feldes mit Hilfe der Photogrammetrie erzeugte Punktwolke ist in **Abb. 4** dargestellt. Wie zu erkennen ist, war es möglich, die Topologie des räumlichen Stabwerkes eindeutig zu replizieren. Die einzelnen Fachwerkstäbe entsprechen in ihrer räumlichen Lage und Länge der realen Struktur.

Detailpunkte sind bezüglich Ort und Abmessungen sehr genau bestimmbar. Exemplarisch hierfür ist die Detailaufnahme eines Stützenfußes der Fußgängerrampe **(Abb. 5)**.

In **Abb. 5** ist vor allem der hohe Detailgrad der Punktwolke zu sehen. Die Genauigkeit der photogrammetrisch erzeugten Punktwolken hängt wesentlich davon ab, ob möglichst viele Fotos aus möglichst vielen Perspektiven aufgenommen werden. Das kann von Hand aber auch mit Hilfe einer Drohne bewerkstelligt werden. Bei der Untersuchung der Thalkirchner Brücke hat sich die Photogrammetrie als sehr leistungsfähig erwiesen. Die erzeugte Punktwolke repräsentiert maßstabsgetreu die Fachwerkstruktur. Somit ist eine örtliche Zuweisung von Befunden wie Anomalien beziehungsweise Schäden sehr gut umsetzbar. Dies ermöglicht die zielgerichtete handnahe Inspektion dieser Stellen.

Abb. 3: Die Thalkirchner Brücke über die Isar und den Isar-Kanal in München

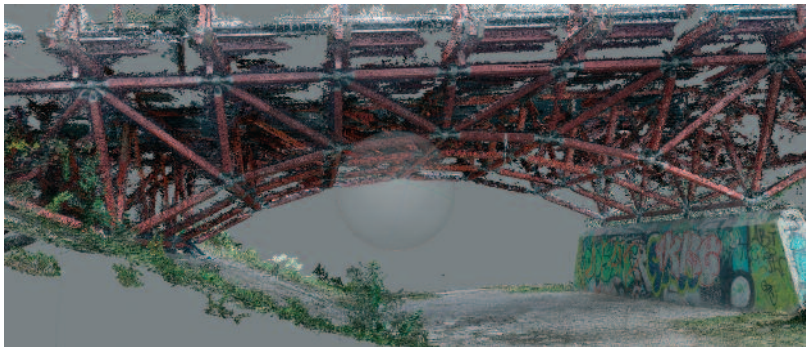

Abb. 4: Photogrammetrisch erzeugte Punktwolke der Thalkirchner Brücke

Abb. 5: Photogrammetrisch erzeugte Punktwolke eines Fußpunktes der Thalkirchner Brücke

Abb. 6: Betonbrücke über die Glonn bei Ebersbach

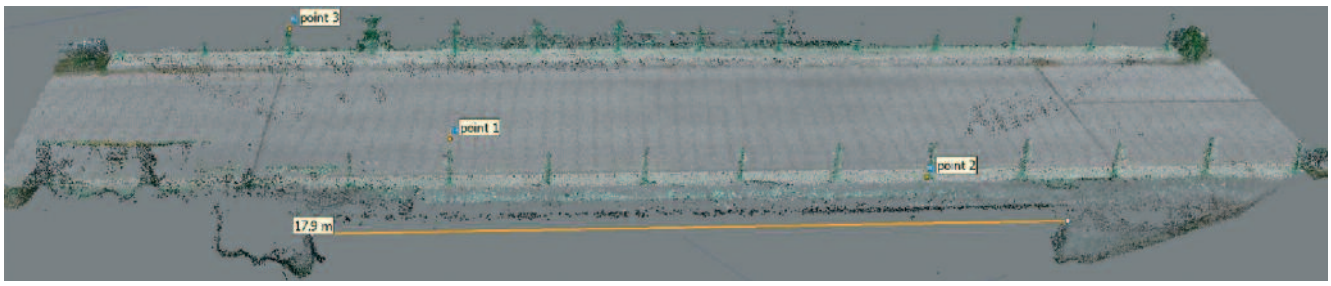

Abb. 7: Photogrammetrische Punktwolke der Betonbrücke bei Ebersbach

■ Straßenbrücke bei Ebersbach

In der Nähe von Ebersbach in Bayern befindet sich eine vierstegige Stahlbeton-Plattenbalkenbrücke **(Abb. 6)**, die den Fluss Glonn überquert. Sie wurde im Rahmen einer Masterarbeit [29] aufgenommen. Das Ziel der Aufnahme dieser Brücke war es, die Genauigkeit einer photogrammetrischen Punktwolke hinsichtlich der Abmessungen eines unbekannten Objektes zu untersuchen. Planungsdokumente lagen nicht vor. Zur Sicherstellung realitätsnaher Abmessungen der mittels Photogrammetrie erzeugten Punktwolke, können zwei Möglichkeiten eingesetzt werden. Erstens die Nutzung von Referenzmarken, die vermessen sind, oder zweitens die Nutzung der Aufnahmepositionen der verwendeten Fotos. Die Skalierung mittels Referenzmarken wurde bei der Fußgängerbrücke Kolbermoor angewandt, die weiter unten vorgestellt wird. Bei der hier beschriebenen Untersuchung wurden die Aufnahmepositionen der Fotos verwendet. Hierfür wurden die GPS-Koordinaten der Drohne herangezogen, die automatisch beim Auslösen der Digitalkamera im Logbuch abgespeichert werden. Um Vergleichswerte der Abmessungen zu erhalten, wurde die Brücke zunächst mit einem Laser-Distometer und einem Maßband vermessen. Da die Brückenunterkante nur circa zwei Meter über der Wasseroberfläche der Glonn liegt, wurde zusätzlich zur photographischen Aufnahme durch Drohnen-Beflug die Brückenunterseite durch Fotos einer Handkamera ergänzt (Nikon D200).

Die absolute Ausrichtung der Bilder ist maßgebend für die Größenskalierung der Punktwolke. Es wurden Fotos aus unterschiedlichen Positionen aufgenommen. Die photogrammetrische Punktwolke, die aus den Bildern eines Befluges ermittelt wurde, ist in **Abb. 7** dargestellt. Diesem Bild kann entnommen werden, dass die Feldweite der Brücke im Modell 17,9 Meter beträgt. Die Messung mit dem Laser-Distometer vor Ort ergab 18 Meter. Das entspricht einer Abweichung von 0,10 Meter, beziehungsweise 0,56 Prozent. Damit ist in diesem Fall, selbst

Abb. 8: Photogrammetrische Punktwolke der Unterseite der Betonbrücke bei Ebersbach

bei den relativ ungenauen Positionsdaten der GPS-Sensoren der Drohne (bis zu zwei Meter Abweichung), aus der Menge an Informationen eine sehr genaue Punktwolke entstanden. Die Messung der Breite der Fahrbahn vor Ort ergab 6,5 Meter. Aus der Punktwolke ergibt sich die Breite ebenfalls zu 6,5 Meter. Die Höhe der Stege beträgt 0,8 Meter, wird aber in der Punktwolke nur mit 0,56 Meter dargestellt. Die Abweichung von 0,25 Meter (also 31 Prozent) ist auf die wenigen Bilder auf Höhe der Stege und auf der Unterseite der Brücke zurückzuführen. Wenn keine zusätzlichen geometrischen Daten mit Hilfe der Vermessung von Referenzmarken oder markanten Punkten am Tragwerk vorhanden sind, müssen mehr Bilder verfügbar sein. Damit lässt sich die Genauigkeit der resultierenden Punktwolke signifikant verbessern. Insofern wäre das Anbringen von Referenzmarken auf der Brückenunterseite von Vorteil gewesen.

In **Abb. 8** ist die Punktwolke der Photogrammetrie dargestellt, die aus den Bildern der Handkamera generiert wurde.

Es ist zu erkennen, dass die texturierte Betonoberfläche sehr gut mit Hilfe der Fotos und der Photogrammetrie reproduzierbar ist. Somit ist der Grad ihrer Anwendungstauglichkeit bei Massivbauwerken im Rahmen der Bauwerksprüfung sehr hoch.

■ Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr München

Diese Versuchsbrücke befindet sich auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr München. Sie wurde in Verbundbauweise erstellt. Das Längssystem ist ein Einfeldträger mit einer Spannweite von 29,9 Meter und einer Deckbreite von vier Meter **(Abb. 9)**.

Die verwendeten Aufnahmegeräte waren die digitale Fotokamera, die an dem unbemannten Fluggerät der Universität montiert war, und der terrestrische Laserscanner der Universität. Die digitale Aufnahme der Brücke mit Hilfe des terristischen Laserscanners wurde in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Geodäsie durchgeführt und in [26] publiziert.

Ziel der Messkampagne war es, die Vergleichbarkeit von dreidimensionalen Punktwolken zu ermitteln. Hier lag der Fokus vor allem auf der Qualität der photogrammetrisch erzeugten Punktwolke. Während der Versuch an der Straßenbrücke bei Ebersbach bereits zeigte, dass die realen Abmessungen von Bauwerken gut von der Punktwolke abgebildet wurden, sollte bei der Versuchsbrücke der Bundeswehr-Universität die gesamte Punktwolke auf die Genauigkeit bezüglich des erfassten Objektes untersucht werden. Eine Zustandsbeurteilung der Versuchsbrücke wurde nicht durchgeführt. Zum einen ergab sich eine Punktwolke direkt mit Hilfe des terrestrischen Laserscanners und zum anderen mit Hilfe der Drohnen-Fotos, die photogrammetrisch verarbeitet wurden. Die berechneten Punktwolken sind in **Abb. 10** und **Abb. 11** dargestellt.

Unterschiede lassen sich bei der Verteilung der Punktwolken und bei den aufgenommenen Oberflächen erkennen. Die erste Punktwolke, die mit Laserscanner erzeugt wurde **(Abb. 10)**, zeigt die Abtastung der Brücke in einem Raster, was an der Funktionsweise des Laserscanners liegt. Alle sichtbaren Flächen sind vollständig abgebildet. Die zweite Punktwolke **(Abb. 11)** wurde aus den Fotodaten mit Hilfe der Photogrammetrie erzeugt. Hier ist eine stark zufällig erscheinende Verteilung der Punkte zu erkennen. Dies geht auf die Methodik der Photogrammetrie zurück, die zur Auswertung markante Punkte benötigt. Die Betonfahrbahn bietet hier sehr viele differenzierbare markante Punkte, die von der Photogrammetrie-Software erkannt, trianguliert und abgebildet werden. An den Stahlträgern ist zu erkennen, dass über große Flächen keine markanten Punkte bestimmt werden konnten. Hier spielen zwei Faktoren eine Rolle. Zum einen konnte das Bauwerk mit der Drohne nicht unterflogen werden und zum anderen bildet die farblich monotone und gleichmäßige Lackierung der Stahlträger keine markanten Punkte. Dies führt dazu, dass die verwendete Software hier keine differenzierbaren Punkte erkennen und somit auch nicht abbilden konnte.

Mit der Open Source-Software CloudCompare [30] wurde ein Vergleich der beiden Punktwolken durchgeführt **(Abb. 12)**. Es ist bemerkenswert, dass die Differenzen zwischen den Punktwolken in jenen Bereichen sehr gering sind, die von beiden Aufnahmemethoden abgebildet werden konnten. Diese betragen im Mittel weniger als 0,01 Meter. Die Stellen, an denen eine der beiden Punktwolken keine Punkte generieren konnte, sind bei diesem Vergleich ausgenommen.

Hier werden aber auch die Unterschiede beider Technologien deutlich. Die größten gemessenen Unterschiede, die an drei ausgewählten Schnitten **(Abb. 13)** erkennbar sind, befinden sich im Bereich der

Abb. 9: Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr München

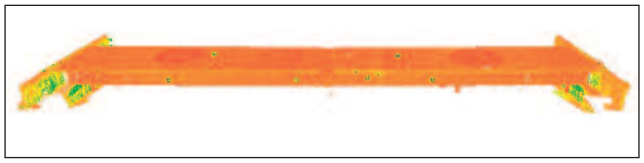

Abb. 10: Mit terrestrischem Laserscanner erzeugte Punktwolke der Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr

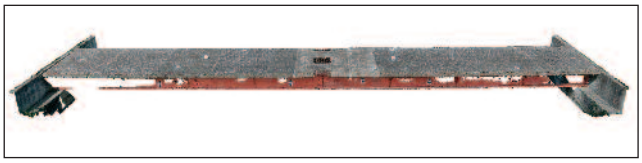

Abb. 11: Mit Photogrammetrie erzeugte Punktwolke der Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr

Stahlhauptträger. In roter Farbe sind die Punkte des Laserscanning, in grüner Farbe die Punkte der photogrammetrischen Auswertung der Bilder der Drohne dargestellt. Durch diesen unmittelbaren Vergleich werden die Unterschiede der beiden Technologien im Detail ersichtlich. **Abb. 13** zeigt auch, dass die Verschattung der Träger durch die Betonfahrbahn bei der Aufnahme durch die Kamera an der Drohne größer ist als bei der Aufnahme durch den Laserscanner. Das liegt an der minimalen Flughöhe der Drohne bei dieser Aufnahme. Eine geringere Flughöhe ist theoretisch möglich, erhöht aber die Gefahr der Bodenkollision. Während sich der Scanner in Bodennähe befand, wurden die Fotos der Kamera der Drohne aus einer größeren Höhe aufgenommen. In bestimmten verschatteten Bereichen weist die Punktwolke aus der Photogrammetrie ein Rauschen auf **(Abb. 13, oben)**. Dieses Bild verdeutlicht **(unten)** außerdem, dass wegen der monotonen Textur der Oberflächen keine markanten Punkte der Stahlträger ermittelt werden konnten.

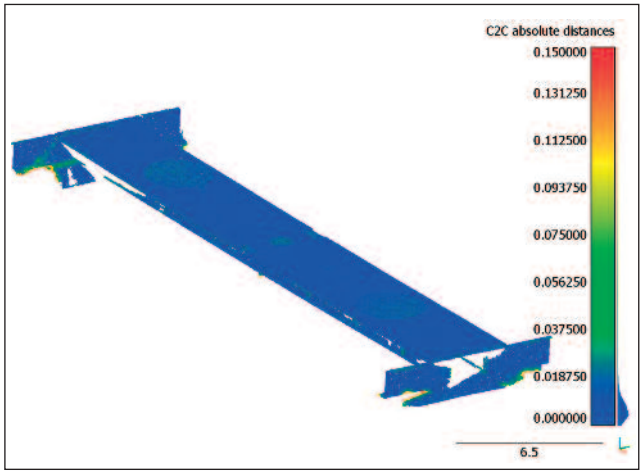

Abb. 12: Vergleich der Punktwolken: Abweichungen zwischen Punkten (in Meter)

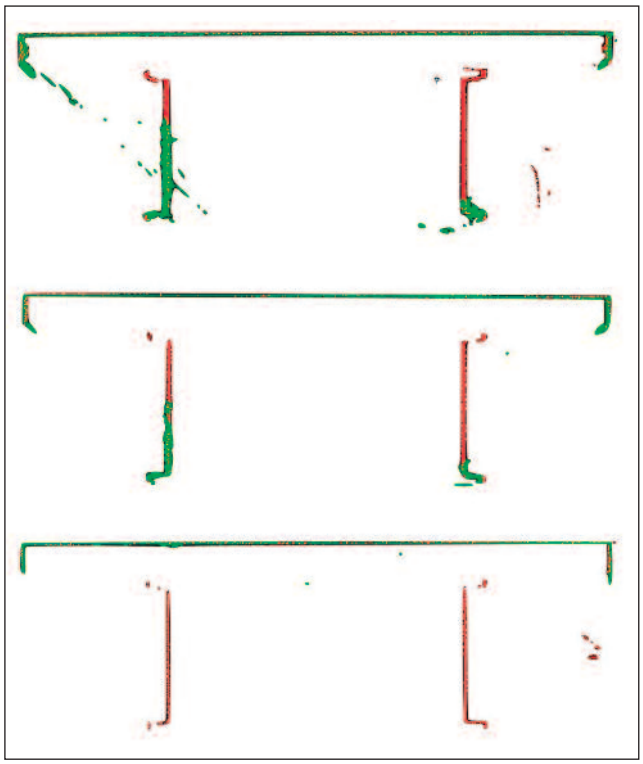

Abb. 13: Überlagerung der ermittelten Querschnitte; rot: terristischer Laserscanner; grün: Photogrammetrie

Der terristische Laserscanner hat bei dieser Versuchsbrücke Vorteile gegenüber der Photogrammetrie, da sich die Brücke in Bodennähe befindet. Bei Anwendung der Photogrammetrie ist die Qualität der Punktwolken von der Textur der Oberflächen abhängig. Stark texturierte Oberflächen lassen sich sehr gut darstellen und in Punktwolken übersetzen. Homogene und schwach texturierte Oberflächen und sehr filigrane Bauteile sind eher schwer zu erfassen. Die stark texturierte Fahrbahnplatte jedoch zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen photogrammetrisch erzeugten und mit klassischem Laserscanner erzeugten Punktwolken. Eine Verbesserung für die Photogrammetrie ergäbe sich, wenn man Referenzmarken setzt. Ihre Verwendung wird (weiter unten) bei der Fußgängerbrücke Kolbermoor erläutert. Durch diesen Vergleich wird deutlich, dass jede Technologie Vor- und Nachteile mit sich bringt.

Wenn die eingesetzte Drohne nicht das ganze Bauwerk umfliegen kann, dann müssen die von ihrer Fotokamera nicht aufgenommenen Oberflächen ohne Nutzung einer Drohnen fotografiert werden. Wie an der Versuchsbrücke gezeigt werden konnte, ist es möglich, aus Fotos mittels Photogrammetrie eine Punkwolke zu erzeugen, die mit der Oberfläche und der Form des realen Bauwerks nahezu übereinstimmt. Somit ist es möglich, zeitlich versetzte Aufnahmen (Ist-Zustände) zu vergleichen und Verformungen und geometrische Veränderungen aufzuzeigen. Damit sind Abweichungen früher feststellbar, als mit einer visuellen Bauwerksprüfung.

Fußgängerbrücke Kolbermoor

Die Fußgängerbrücke Kolbermoor im Landkreis Rosenheim wurde im März 2016 fertiggestellt und besteht aus einem Stahlkasten mit Betonfahrbahn. Die Brücke ist von einem 24 Meter hohen Pylon abgespannt **(Abb. 14)**, überspannt 50 Meter und hat eine Plattenbreite von 3,5 Meter.

Im Zuge einer Masterarbeit [31] wurde die Brücke mit einer Drohne beflogen, die mit einer Digitalkamera ausgestattet war. Die aufgenommenen Fotos wurden genutzt, um mit Hilfe der Photogrammetrie eine Punktwolke der Brücke zu erstellen. Eine zweite Punktwolke wurde durch die Auswertung eines terrestrischen Laserscans erzeugt. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Punktwolken der Photogrammetrie und dem Laserscan sicherstellen zu können, wurden 29 Referenzmarken am Bauwerk angebracht, die von beiden Technologien erfasst werden können.

Die bereits bei der Straßenbrücke bei Ebersbach erwähnten Referenzmarken können dazu genutzt werden, eine räumliche Ausrichtung der Punktwolken an geographischen Koordinaten durchzuführen. Die Referenzmarken wurden mit einem Tachymeter ausgemessen, um die geografischen Koordinaten der Referenzmarken zu ermitteln. Die Koordinaten wurden bei der Punktwolkenerstellung mittels Photogrammetrie und terristischem Laserscanner berücksichtigt. Auf diese Weise wurde eine einheitliche Ausrichtung der Punktwolken im Raum gewährleistet. Damit wird die Untersuchung, die an der Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr durchgeführt worden war (siehe oben), um die Komponente der absoluten Ausrichtung an geographischen Koordinaten erweitert. Hier konnten die Punktwolken aus Photogrammmetrie und Laserscan unabhängig miteinander verglichen werden. Abweichungen können nun nicht nur aus Ungenauigkeiten der Punktwolken selbst, sondern auch aus der Ausrichtung der Punktwolken im Raum resultieren.

Abb. 14: Fußgängerbrücke in Verbundbauweise über die Mangfall in Kolbermoor

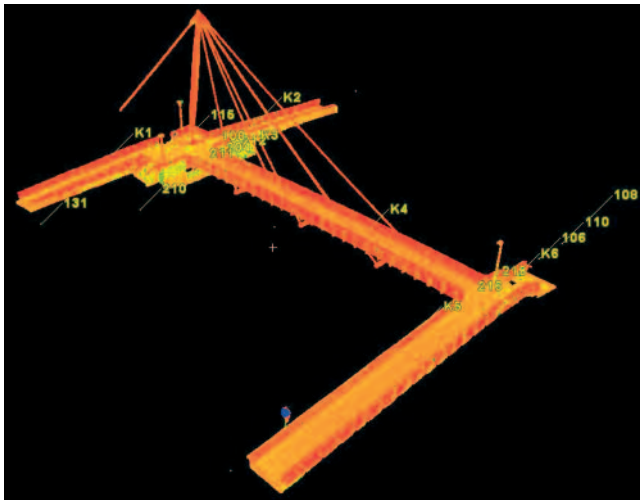

Abb. 15: Mit terristischem Laserscann erzeugte Punktwolke der Fußgängerbrücke)

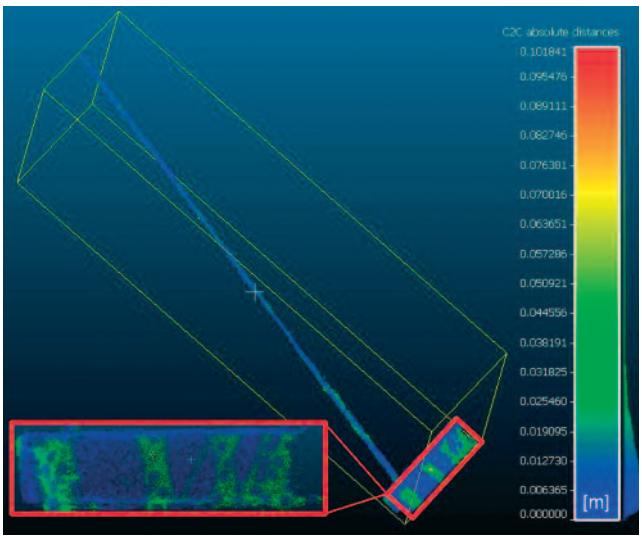

Abb. 17: Vergleich der Punktwolken (Photogrammetrie und Laserscan) eines Querriegels der Fußgängerbrücke in Kolbermoor

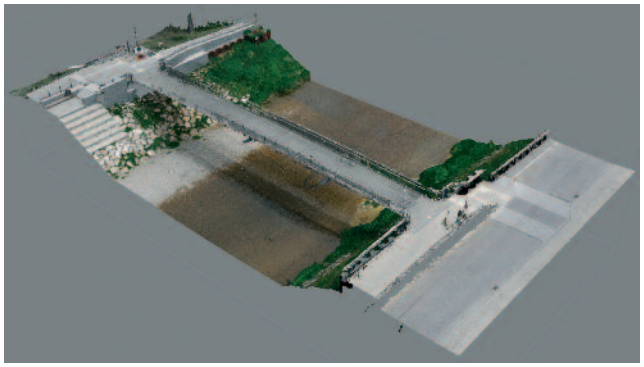

*Abb. 16: Mit Photogrammetrie erzeugte Punktwolke der Fußgängerbrücke (siehe **Abb. 14**), (Aufnahmen mit der Drohne Falcon 8)*

Die Punktwolke, die mit den Daten des Laserscanners erstellt wurde, ist in **Abb. 15** dargestellt. Vergleichend stellt **Abb. 16** die Punktwolke dar, die mit der Photogrammetrie berechnet worden ist. Beim Vergleich der beiden Punktwolken der Fußgängerbrücke können ähnliche Schlussfolgerungen wie für die Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr München gezogen werden. Während die mittels terrestrischem Laserscanning erzeugte Punktwolke eine starke Regelmäßigkeit aufweist und unabhängig von der Oberflächentextur ist, ist die Punktwolke, die mittels Photogrammetrie gewonnen wurde, in ihrer Verteilung zufälliger. Die Hintergründe dieses Sachverhalts wurden bei der Beschreibung der Untersuchungen an der Versuchsbrücke der Bundeswehr-Universität in München oben eingehend dargestellt und erläutert.

*Abb. 18: Kopfpunkt des Pylons der Fußgängerbrücke (siehe **Abb. 14**): links die Punktwolke (Photogrammmetrie, Drohne), rechts die Realität*

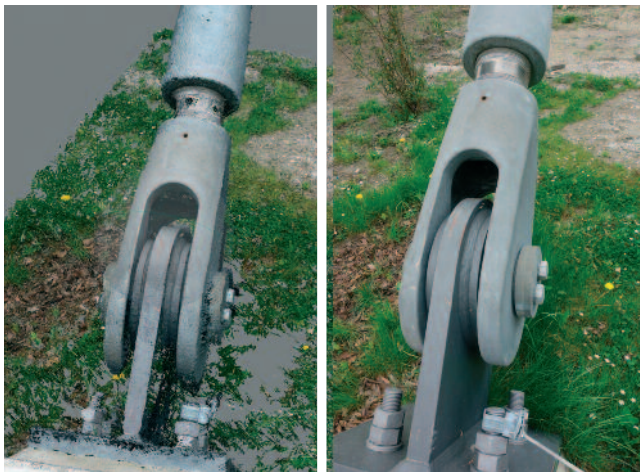

*Abb. 19: Verankerungspunkt für die Seilabspannung der Fußgängerbrücke **(Abb. 14)**: links die Punktwolke mit Photogrammetrie und Handkamera, rechts die Realität*

Da die Drohne eine mobile und standortunabhängige Trägerplattform ist, können mit ihr Fotos aus unterschiedlichen Höhen und Perspektiven aufgenommen und Verschattungen vermieden werden. Das ist im Falle der Fußgängerbrücke von Vorteil. Verschattungen sind deshalb in der Punktwolke nicht vorhanden, weil die Aufnahmen durch die Drohne aus unterschiedlichsten Positionen aufgenommen wurden. Der stationäre und bodengebundene Laserscanner hat hier einen Nachteil. Die Verschattungen schlagen sich in der mit ihm erzeugten Punktwolke nieder.

Der Verdeutlichung des Vorteils einer mobilen Sensorträgerplattform im Vergleich mit bodengebundenen Aufnahmegeräten, dient ein Ausschnitt eines Querriegels der Fußgängerbrücke, an dem die Seile befestigt sind. In **Abb. 17** ist der Vergleich der Punktwolken dargestellt. Die absolute Distanz zwischen den Punkten der einzelnen Punktwolken ist farblich gekennzeichnet. **Abb. 17** ist auch zu entnehmen, dass der Riegel durch den bodengebundenen Laserscanner nicht vollständig aufgenommen wurde. Dies liegt an Abschattungen durch das Geländer. Sie entstehen, wenn Teilflächen des aufzunehmenden Objektes durch einen näher positionierten Gegenstand, oder eine vorstehende Fläche verdeckt werden, die nicht umgangen werden kann. (Solche Abschattungen sind im Übrigen mit jedem standortlimitierten Aufnahmesystem möglich.) In dem photogrammetrischen Modell wurde das Bauteil vollumfänglich abgebildet, was nur durch die Verwendung der standortunabhängigen Drohne möglich war.

Weiterhin wurden zwei besondere Detailpunkte untersucht. Zum einen wurde der Kopfpunkt des Pylons der Brücke **(Abb. 18)** und zum anderen der Verankerungspunkt für die Seilabspannung **(Abb. 19)** aufgenommen. Für die photogrammetrisch erzeugte Punktwolke des Kopfpunktes des Pylons wurden 257 Bilder bei mehreren Drohnen-Beflügen aufgenommen. Die photogrammetrisch erzeugte Punktwolke der Verankerung der Seile am Fundament, basiert auf 47 Fotos, die mit einer Handkamera aufgenommen wurden.

Beide Bilder zeigen einen hohen Detailgrad des komplexen Kopfpunktes und der Verankerung der Seilabspannung. Wie in **Abb. 18** und auch in **Abb. 19** zu erkennen ist, wurden die Details mit Hilfe der durch Photogrammetrie erzeugten Punktwolke vollumfänglich dargestellt. Diese Detailpunkte hätten mit dem Laserscanner nur mit einem großen Mehraufwand in ähnlicher Genauigkeit aufgenommen werden können.

Wie jetzt gezeigt werden konnte, sind die Abweichungen der Punktwolken mittels Photogrammetrie und mittels terristischem Laserscanner sehr gering. Dies gilt sowohl für die lokalen Abweichungen untereinander, als auch für die absolute Ausrichtung im Raum. Die Aufnahme mit einer Drohne zeigt Vorteile aufgrund ihrer Standortunabhängigkeit. Verschattungen lassen sich überwiegend vermeiden. Dies führt zu der Möglichkeit der Kombination beider Technologien. Ebenfalls zeigt sich die Drohne vorteilhaft bei der Erfassung von schwer zugänglichen Bauteilen (beispielsweise am Kopfpunkt des Pylons).

2.3.3 Ergebnis der Tests an Brücken

Zusammenfassend lässt sich für die Untersuchungen an den Brücken feststellen, dass sich das terrestrische Laserscanning und die Datenakquisition durch eine Drohne mit anschließender photogrammetrischer Auswertung sehr gut ergänzen. Zur Photogrammetrie lässt sich feststellen, dass die Qualität der Punktwolken von der Textur der Oberflächen abhängig ist. Stark texturierte Oberflächen lassen sich sehr gut darstellen und in Punktwolken übersetzen. Homogene und schwach texturierte Oberflächen und sehr filigrane Bauteile sind schwer zu erfassen. Wo jedoch die Punktdichte ausreichend ist, gibt es sehr gute Übereinstimmungen zwischen photogrammetrisch erzeugten Punktwolken und klassischem terristischen Laserscan. Es wird empfohlen, Referenzmarken zu verwenden. Die Verwendung von Drohnen ermöglicht Aufnahmen aus unterschiedlichsten Perspektiven. Wir haben bisher das Laserscanning von einer Drohne aus nicht getestet. Ihre Verwendung hat sich generell als positiv herausgestellt, um weit entfernte oder schwer zugängliche Stellen an Bauwerken aufzunehmen. Für eine Zustandsbeurteilung erfolgen vor allem visuelle Bewertungen von Fotos. Es ist jedoch sinnvoll, Bildanalyseverfahren einzusetzen, mit denen Schäden erkannt und sichtbar gemacht werden können [21], [22]. Das soll im Rahmen der weiteren Bearbeitung des oben genannten Forschungsprojektes untersucht werden. Zusätzlich können aus den Fotos, die von Drohnen aufgenommen wurden, photogrammetrische Punktwolken des Gesamtbauwerkes erzeugt werden. Mit ihnen lassen sich Vorher-Nachher-Vergleiche durchführen. Dabei können beispielsweise Verformungen des Systems oder Veränderungen der geometri-

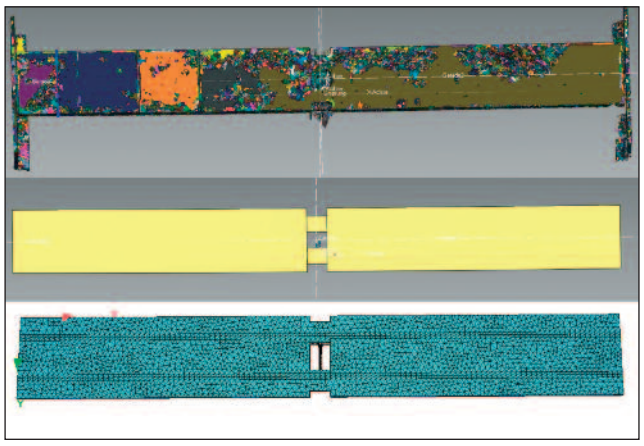

*Abb. 20: Überführung der photogrammetrischen Punktwolke der Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr in München (siehe **Abb. 9**) in ein numerisches Flächenmodell*

schen Abmessungen erkannt werden. Darüber hinaus können sie zur Lokalisierung von Anomalien genutzt werden. Dies ermöglicht eine vollumfassende Zustandsbeurteilung.

2.4 Überführung von Punktwolken in dreidimensionale Modelle für die Berechnung und für das BIM

Neben der Bauwerksüberwachung und -dokumentation mit Fotodaten, können berechnete Punktwolken als Grundlage der Erstellung dreidimensionaler Modelle genutzt werden, die wiederum Grundlage einer BIM-Modellierung sind. Diese Modelle können sowohl numerischer (FEM), als auch grafischer Natur (CAD) sein. Mit ihnen lässt sich das gegenwärtige Bauwerksverhalten abbilden und berechnen. Daraus kann auf den Bauwerkszustand geschlossen werden.

Ausgehend von einer Punktwolke ist es möglich, ein ebenes oder gekrümmtes Flächenmodell (Scheiben, Platten, Schalen) oder ein Volumenmodell (Kontinuum) zu generieren. Es gibt mehrere Möglichkeiten, solche Modelle zu erstellen. Sehr praktikabel und einfach, jedoch mit dem größten Aufwand verbunden, ist es, Abmessungen von Querschnitten, Abstände oder Koordinaten von Knotenpunkten (Fachwerk) und markanten Punkten, wie Ecken von flächigen Bauteilen, aus den Punktwolken zu messen. Diese geometrischen Daten können anschließend bei der Erstellung eines Flächen- oder Volumenmodells weiterverwendet werden.

Um eine präzise Geometrie für die Erstellung eines Modells zu erhalten, empfiehlt es sich, die Positionen möglichst vieler Punkte zu verwenden. Zum Beispiel können die umhüllenden Flächen einer Platte aus der Punktwolke ermittelt werden. Diese umhüllenden Flächen bilden die Basis für ein Volumenmodell. Alternativ hierzu besteht die Möglichkeit, im Falle von Platten, Scheiben oder Schalen, Flächenmodelle zu erstellen, da Flächentragwerke mit Hilfe ihrer Referenzfläche (Mittel- oder Außenfläche) beschrieben werden. Über einen vom Nutzer definierten Schnitt durch das geometrische Objekt lässt sich eine Referenzfläche extrahieren. Diese Herangehensweise wurde bereits unter der Zuhilfenahme einer NURBS-fähigen CAD-Software getestet. Die Fahrbahnplatte der Versuchsbrücke auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr in München wurde mit Hilfe der Funktionen der CAD-Software auf Grundlage der Punktwolke in ein Flächenmodell umgewandelt **(Abb. 20)**.

Wie bereits erwähnt, konnte die Versuchsbrücke für die photogrammetrische Auswertung nicht von unten durch eine Drohne aufgenommen werden. Somit ist die Modellierung der Fahrbahn der Brücke als Flächenmodell naheliegend. Wenn mit der Punktwolke ein evidentes Netz erstellt werden kann, dann lässt sich eine geschlossene CAD-Fläche erzeugen. Diese kann unter Berücksichtigung der Querschnittsdaten zu einem CAD-Volumenmodell erweitert werden.

Handelsübliche CAD-Software ist für die Verarbeitung von Punktwolken mit einer großen Anzahl an Punkten nur bedingt geeignet. Die Algorithmen für die Oberflächenannäherung mit NURBS-Flächen sind zwar genau, jedoch sind die Rechenzeiten auf Grund der besonders hohen Anforderungen an die zu erstellenden Modelle sehr lang.

Bessere Lösungen für die Überführung von Punktwolken in dreidimensionale Modelle bietet eine sogenannte Reverse Engineering Software. Mit ihr werden die Oberflächen, die von einer Punktwolke beschrieben werden, mit Hilfe der Mantelflächen von Grundelementen, wie Zylinder und Kugeln, angenähert. In **Abb. 20 (oben)** ist diese Näherung dargestellt. Jede eingefärbte Fläche entspricht einem Teil der Mantelfläche eines Grundelementes. Die so entstehenden Flächen werden anschließend durch eine NURBS-Fläche approximiert **(Abb. 20, Mitte)**. In einem weiteren Schritt werden die aus den Punktwolken erstellten grafischen Flächen- und Volumenmodelle in eine FE-Software importiert. Hier können diese vernetzt und somit in ein numerisch berechenbares Modell umgewandelt werden.

Die Reverse Engineering Software wurde bereits bei der Überführung von Punktwolken in berechenbare FE-Modelle durch die Professuren für Stahlbau und Ingenieurgeodäsie der Universität der Bundeswehr München im Rahmen eines Industrieprojekts durchgeführt. Das Projekt behandelte die Bestimmung der maximalen Tragfähigkeit von kaltgeformten, dünnwandigen U-Profilen aus Stahl. Zur Erfassung der geometrischen Imperfektionen erfolgte zunächst die Aufnahme der

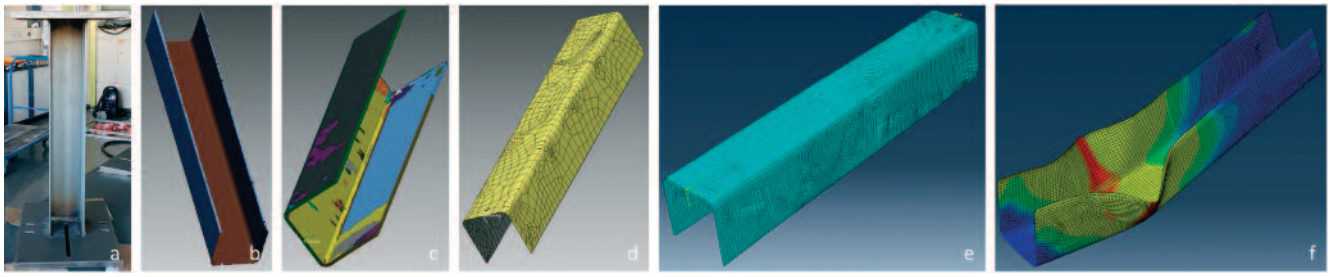

Abb. 21: Überführungsfolge bei der Transformation von Punktwolken in eine FE-Modellierung: a): Reales Testprofil, b): gescannte Punktwolke, dargestellt im STL-Freiecksformat, c): farbliche Hervorhebung erkennbarer Imperfektionen, d): NUBRS-Oberfläche, e): FE-Vernetzung in ABAQUS, f): ABAQUS-Ergebnis

Oberflächen der Probekörper mit einem 3D-Handscanner. Ausgehend von den daraus erzielten Daten der Punktwolke wurden entsprechend der in **Abb. 21** aufgezeigten Prozesskette geometrische Umwandlungen durchgeführt, bis schließlich mittels eines kommerziellen FE-Programms ein FE-Schalenmodell erzeugt werden konnte. Weiterhin wurde durch Zugversuche das elastisch-plastische Materialverhalten des Stahls ermittelt. Somit konnten geometrisch und materiell nichtlineare FE-Berechnungen durchgeführt werden, die die materielle Nichtlinearität und die tatsächlichen Formabweichungen von der Sollgeometrie der untersuchten Probekörper beinhalteten. In **Abb. 21 (f)** ist ein hieraus erzieltes Berechnungsergebnis dargestellt.

Der Grad der Übereinstimmung der numerischen Prognose der Tragfähigkeit mit der experimentell ermittelten Tragfähigkeit kann mit dieser Vorgehensweise deutlich erhöht werden. Gerade für die Untersuchung des Tragverhaltens imperfektionsempfindlicher Bauteile und Konstruktionen birgt die Erfassung und Berücksichtigung der Realgeometrie im numerischen Modell ein großes Potential. Aufgrund der sich stetig verbessernden Scan-Technologie sowie ihrer computergestützten Bearbeitung innerhalb akzeptabler Rechenzeiten, besteht die Möglichkeit, den tatsächlichen Einfluss vorhandener Imperfektionen detailliert nachzuvollziehen, beispielsweise auf das Stabilitätsverhalten von Bauteilen. Diese neuen wirklichkeitsnahen Analysemethoden sind für die Zustandsermittlung von Tragwerken von entscheidender Bedeutung.

3 Bauwerksmonitoring – Schwingungsmessungen mit Hilfe von Smartphones

3.1 Stand der Forschung

Zum Bauwerksmonitoring gehören Verformungs- und Schwingungsmessungen. Aus letzteren werden die Eigenfrequenzen und deren zugehörige Eigenmoden bestimmt. Sie beschreiben das strukturtypische Schwingverhalten einer Konstruktion. Die Antwortschwingungen eines angeregten Bauwerks sind durch dessen Eigenfrequenzen und durch die dazu gehörigen Eigenmoden charakterisiert. Wird ein Tragwerk in einer seiner Eigenfrequenzen angeregt, dann führt das zu Resonanzerscheinungen. Dabei entstehen extrem große Schwingungsamplituden. Die Eigenfrequenzen sind primär abhängig von der Steifigkeitsverteilung und von der Masseverteilung des Tragwerks. Eine Änderung der Steifigkeitskenngrößen einer Struktur, die zum Beispiel auf eine Schädigung zurückzuführen ist, kann durch eine Verschiebung der Eigenfrequenzen erkannt werden [32]. Da die Eigenfrequenzen nicht nur rechnerisch, sondern auch mit Hilfe von Schwingungsmessungen am Bauwerk ermittelt werden können, ist es folglich auch möglich, entstandene Strukturänderungen durch eine Auswertung von Schwingungsmessungen zu erkennen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Eigenfrequenzen ein Fingerabdruck des ganzen Tragwerks sind. Daher können mit dieser Methode nur Schäden mit signifikantem Einfluss auf das globale Tragverhalten erkannt werden.

In [33] wurden zwei verschiedene Ansätze der Schadensdetektion an Stahlbetontragwerken untersucht. Erstens eine Updatetechnik, die mit wenigen Beschleunigungssensoren durchgeführt werden kann, und zweitens eine direkte Steifigkeitsberechnung, bei der experimentell gemessene Eigenmoden berücksichtigt werden. Die Updatetechnik ist stark von Umwelteinflüssen und den statisch-konstruktiven Randbedingungen abhängig und deshalb fehleranfällig. Die direkte Steifigkeitsberechnung benötigt zwar kein numerisches Modell, aber ein sehr dichtes Sensornetz. Die praktische Anwendung der direkten Steifigkeitsberechnung scheitert derzeit an den Kosten des dichten Sensornetzes. Klassische Sensoren für die Schwingungsmessung sind meistens zu teuer, um ein dichtes Sensornetz mit diesen Sensoren zu erstellen. Weitere Arbeiten über die Auswertung von Schwingungen in Bezug auf die Schadensdetektion und die Systemidentifizierung sind beispielsweise in [34] und [35] zu finden.

Um die Antwortschwingung eines Bauwerks zu messen, kommen im Allgemeinen hochsensible Akzelerometer (Beschleunigungssensoren) oder Geophone (Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitssensoren) zum Einsatz. Da in heutigen Smartphones Beschleunigungssensoren verbaut sind, wollten wir untersuchen, ob Smartphones für die Messung von Brückenschwingungen verwendet werden können. Hierbei stellt sich die Frage, inwieweit die Genauigkeit und die Sensitivität von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren einen Einfluss auf die Schwingungsmessungen von Brücken haben. Die Beschleunigungssensoren, die in Smartphones und Tablets (im Folgenden als mobile Geräte bezeichnet) verbaut werden, sind wesentlich günstiger als bisherige Sensoren für die Schwingungsmessung. Darüber hinaus bieten mobile Geräte den Vorteil, dass eine Recheneinheit eingebaut ist und bereits eine Softwareschnittstelle mit dem Betriebssystem (in den hier beschriebenen Versuchen Android) vom Hersteller vorgesehen ist. Im Zuge der Recherchen fanden wir eine Publikation [36], in der beschrieben wird, wie ein Sensornetzwerk durch Smartphones aufgebaut wurde, um Erdbeben in bis zu 30 Kilometer Entfernung erfolgreich zu detektieren. Ein solcher Ansatz erscheint auch für die Nutzung von mobilen Geräten für die Messung von Brückenschwingungen vielversprechend zu sein.

3.2 Anwendungstauglichkeit von Smartphones für das Bauwerksmonitoring

Um die Anwendungstauglichkeit von Smartphones für das Bauwerksmonitoring zu untersuchen, wurden verschiedene Experimente durchgeführt, die im Folgenden erläutert werden.

Zunächst wurden unter Laborbedingungen verschiedene mobile Geräte (Smartphones und Tablets) und ein klassisches Schwingungsmesssystem an einem Einfeldträger verglichen. Im Anschluss daran wurden Experimente an realen Brücken durchgeführt. An der Versuchsbrücke auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr München **(Abb. 9)** wurden an verschiedenen Versuchsaufbauten Schwingungen gemessen. Dabei sollte der Einfluss von Systemänderungen untersucht werden. Um die Anwendung der Schwingungsmessung mit Smartphones an einer Brücke unter Straßenverkehr zu testen, wurde eine Brücke ausgewählt, die den Fluss Lesum in Bremen überquert. Neben der Anwendungstauglichkeit wurden die Anwendungsgrenzen von mobilen Geräten und Probleme bei der Durchführung der Messung bewertet und dokumentiert. Alle Experimente wurden in Zusammenarbeit mit der Hochschule Mittweida durchgeführt, die maßgeblich an der Entwicklung und Untersuchung der hier beschriebenen Methodik beteiligt ist. Diese Untersuchung ist ein Teil der Forschungsarbeiten des deutsch-indischen BMBF-Forschungsvorhabens FloodEvac, in dessen Rahmen – unter Leitung der Universität der Bundeswehr München – der Einfluss von Hochwasser auf Infrastrukturen des Transports (also auf Straßen, Brücken, Tunnel und Dämme) untersucht und ein System für die Optimierung von Evakuierungsrouten und für zivile Sicherheitsplanungen entwickelt werden soll.

3.2.1 Sensorik

Die in mobilen Geräten verbauten Messsensoren (Akzelerometer) messen die Beschleunigung in einem orthogonalen, dreidimensionalen Koordinatensystem. Für Smartphones wird die maximale Abtastra-

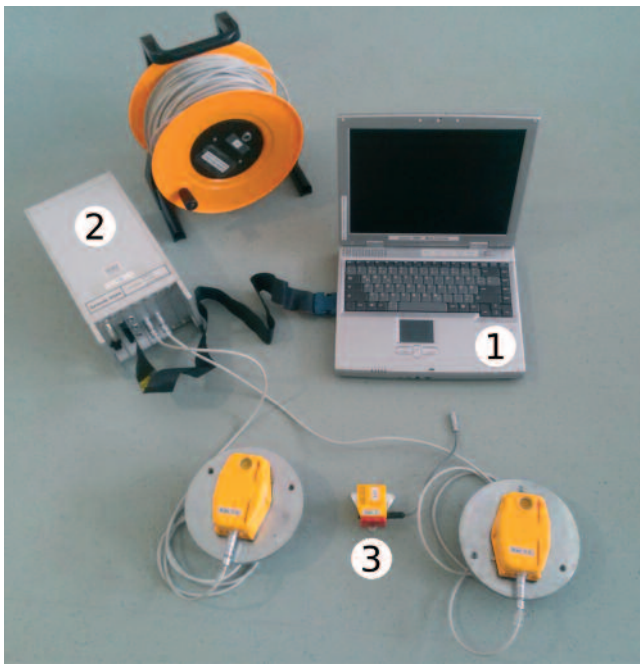

Abb. 22: Klassisches System für Schwingungsmessungen (SMS): 1: Computer, 2: Analog-Digital-Wandler, 3: Messsensoren (Geophone)

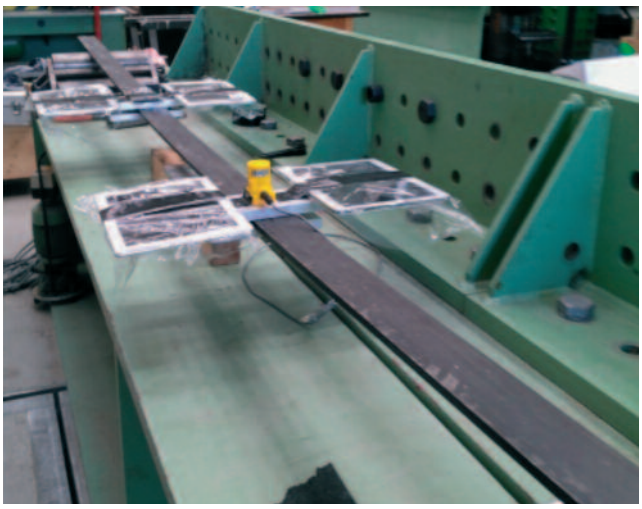

Abb. 23: Laborversuch am Einfeldträger

te der Beschleunigungssensoren zu 100 Hertz angegeben, bei Tablets liegt die Abtastrate bei 200 Hertz. Die Sensitivität der Sensoren ist jedoch bei Tablets geringer als bei Smartphones. Die Smartphones und Tablets können als Messsystem in einem Gerät gesehen werden, da sowohl die Akzelerometer als auch die aufzeichnende und verarbeitende Recheneinheit in einem Gerät verbaut sind.

Bei klassischen Schwingungsmesssystemen (SMS) werden ebenfalls Akzelerometer als Sensoren verwendet. Es kommen jedoch auch Geophone zum Einsatz, die die Geschwindigkeit messen. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete klassische Schwingungsmesssystem **(Abb. 22)** besitzt Messsensoren (Geophone), die eine Abtastfrequenz von circa 2048 Hertz aufweisen und die die Geschwindigkeit messen. In **Abb. 22** sind außerdem die Geophone dargestellt (3). Die beiden äußeren Messsensoren sind dreikanalige Geophone, die die Geschwindigkeit in drei Achsrichtungen messen (zweimal horizontal, einmal vertikal). In der Mitte von **Abb. 22** ist ein einkanaliges Geophon (3) zu sehen, das in einer Achsrichtung aufzeichnet. Neben den Messsensoren besteht das klassische SMS aus einem Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) und einer Recheneinheit (Computer). Der Computer zeichnet das analog gemessene Signal in digitaler Form auf.

3.2.2 Laborversuche am Einfeldträger

Bei den Laborversuchen an einem Einfeldträger (EFT) wurden verschiedene Smartphones, Tablets und ein vertikal messendes, einkanaliges Geophon eingesetzt und deren Ergebnisse miteinander verglichen **(Abb. 23)**.

Der Einfeldträger war ein Flachstahl mit den Querschnittsabmessungen von 60 Millimeter Breite und 10 Millimeter Höhe. Die Feldlänge betrug 2,54 Meter. Es wurde in zwei verschiedenen Konfigurationen gemessen. Die beiden Konfigurationen unterscheiden sich durch die Messstellen. Zum einen wurden die Messsensoren in Feldmitte angebracht, zum anderen in den Drittelspunkten. Somit konnten symmetrische und antimetrische Eigenmoden erfasst werden. Der Einfeldträger wurde durch eine Vorauslenkung aus der Ruhelage angeregt. In **Abb. 24** sind die aufgezeichneten Antwortsignale der Messung in Feldmitte eines Tablets (Nexus 7) und des Geophons dargestellt.

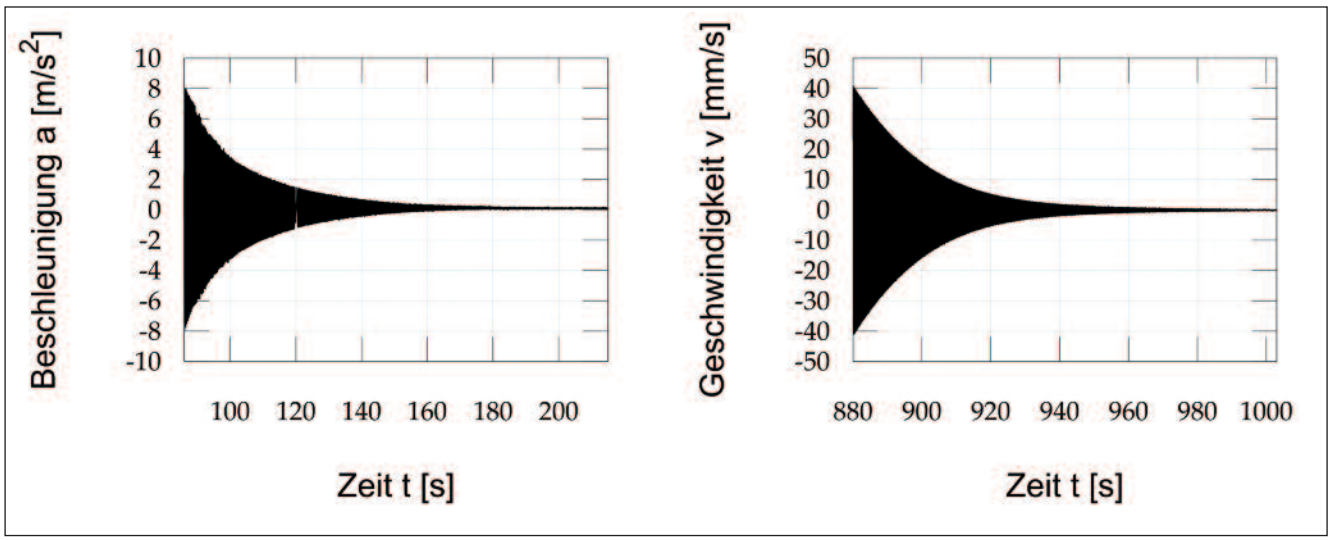

Abb. 24: Aufgezeichnete Antwortsignale des Tablets Nexus 7 (links) und des SMS (rechts); Ort der Messung: Feldmitte

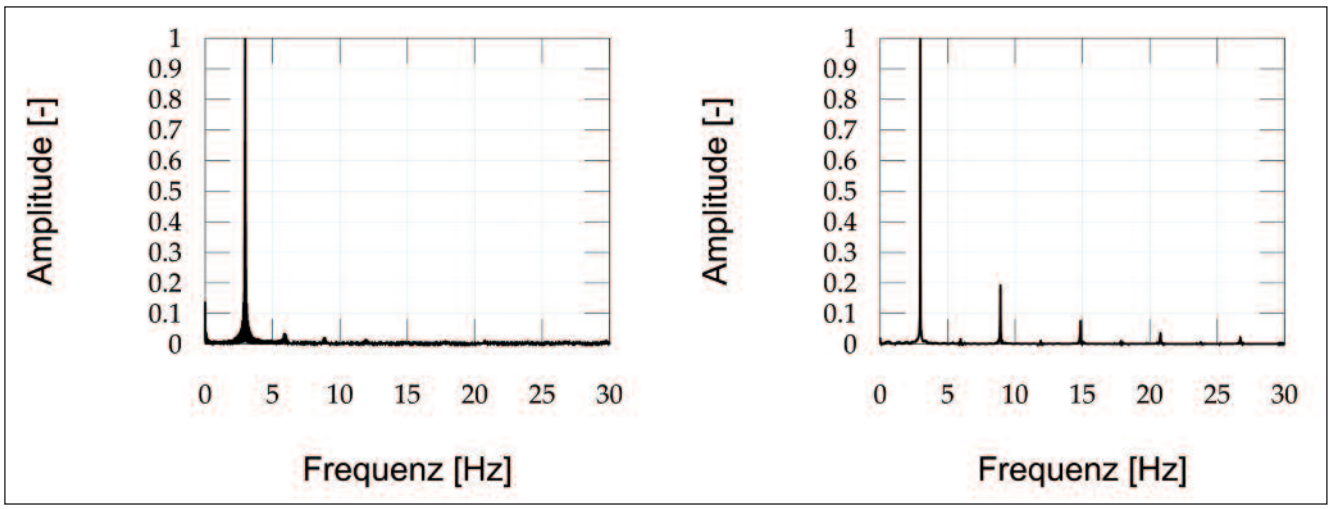

Abb. 25: Auswertung der Schwingungsmessung am Einfeldträger: Frequenzspektrum des Tablets Nexus 7 (links) und des klassischen Schwingungsmesssystem SMS (rechts); Ort der Messung: Feldmitte

Mit Hilfe einer Auswertung durch eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) wurden die vorherrschenden Frequenzen für jedes Anregungs-Ausschwing-Intervall der Messungen bestimmt. Diese Frequenzen sind die Eigenfrequenzen des Systems. Die aufgezeichneten Signale sowohl der mobilen Geräte als auch des klassischen SMS wurden einer FFT unterzogen und damit aus dem Zeitspektrum in das Frequenzspektrum überführt. Vergleicht man die Frequenzspektren des Tablets (Nexus 7) und des SMS **(Abb. 25)**, dann wird ersichtlich, dass die mittels Smartphone und klassischem Schwingungsmesssystem SMS ermittelten Eigenfrequenzen eine gute Übereinstimmung zeigen. Aus den Aufzeichnungen des Tablets (Nexus 7) wurde eine Eigenfrequenz von 2,967 Hertz bestimmt. Das klassische Schwingungsmesssystem ergab eine Eigenfrequenz von 2,978 Hertz. Während die ermittelten Eigenfrequenzen mit einer Abweichung von 0,011 Hertz nahezu gleich sind, ist in **Abb. 25** auch deutlich zu erkennen, dass die Amplitudenanteile der höheren Frequenzen beim Tablet (Nexus 7) wesentlich geringer sind als beim klassischen Schwingungsmesssystem. Dieser Unterschied der Frequenzspektren ist auf zwei Gegebenheiten zurückzuführen: Einerseits besitzen die mobilen Geräte, wie bereits oben in Kapitel 3.2.1 beschrieben, eine wesentlich geringere Abtastrate als das klassische Schwingungsmesssystem, und andererseits ist die Sensitivität der Sensoren des klassischen Messsystems höher als die der mobilen Geräte.

Im Messaufbau **(Abb. 23)** dieses Laborversuches spielten die Massen der Halterungen und Messsensoren eine große Rolle bezüglich der Eigenfrequenz des EFT, weil die Masse des EFT vergleichsweise gering war. Aus diesem Grund wurden die mobilen Geräte und das Geophon des klassischen SMS sowie die Halterungen gewogen, auf denen alle Messsensoren montiert waren. Zusammen mit der Masse des Flachstahls wurde die genaue Masse des EFT ermittelt. Die Steifigkeit des Einfeldträgers wurde rechnerisch bestimmt. Beide Werte (Steifigkeit und Masse) werden für den repräsentativen Einmasseschwinger zur Berechnung der ersten Eigenfrequenz benötigt (nach [37]). Mit Hilfe des Einmasseschwingers wurde die erste Eigenfrequenz des EFT zu 2,949 Hertz berechnet. Vergleicht man die Werte aus den Messungen mit dem berechneten Wert, zeigt sich quasi eine Übereinstimmung, bei einer maximalen Abweichung von einem Prozent.
(Weitere Ergebnisse und eine genauere Darstellung sind Bestandteil einer noch nicht veröffentlichten Arbeit.)

3.2.3 Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr München

An der Versuchsbrücke auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr wurden Versuche durchgeführt, um den Einfluss von Systemänderungen auf Eigenfrequenzen und die Möglichkeit zu deren Ermittlung durch Messungen mit mobilen Geräten zu untersuchen. Wie bereits weiter oben beschrieben, handelt es sich bei der Versuchsbrücke um eine 29,90 Meter lange Verbund-Plattenbalkenbrücke mit zwei Stahlhauptträgern (HEB1000). Die Fahrbahn besteht aus vier Meter breiten und 0,20 Meter hohen Stahlbetonplatten **(Abb. 9)**.

Die Schwingungsmessungen wurden für verschiedene Versuchskonfigurationen durchgeführt. Das statische System der einfeldrigen Brücke wurde zunächst durch das Einsetzen von Stützen modifiziert.

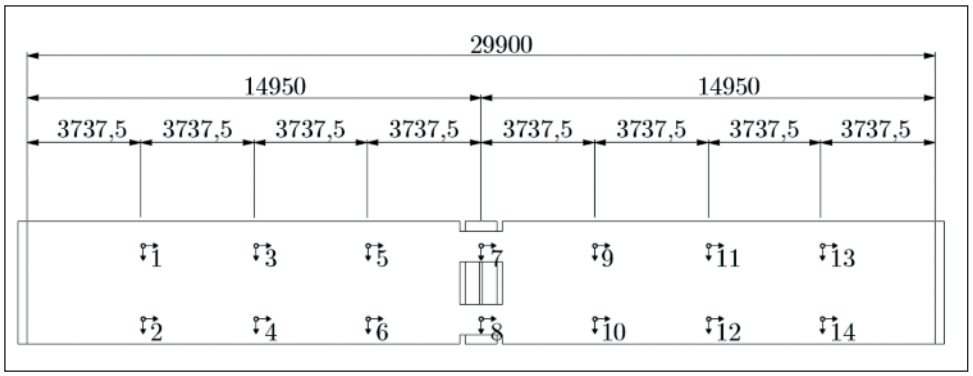

*Abb. 26: Versuchsübersicht der Schwingungsmessungen an der Versuchsbrücke der Universität der Bundeswehr München (siehe auch **Abb. 9**)*

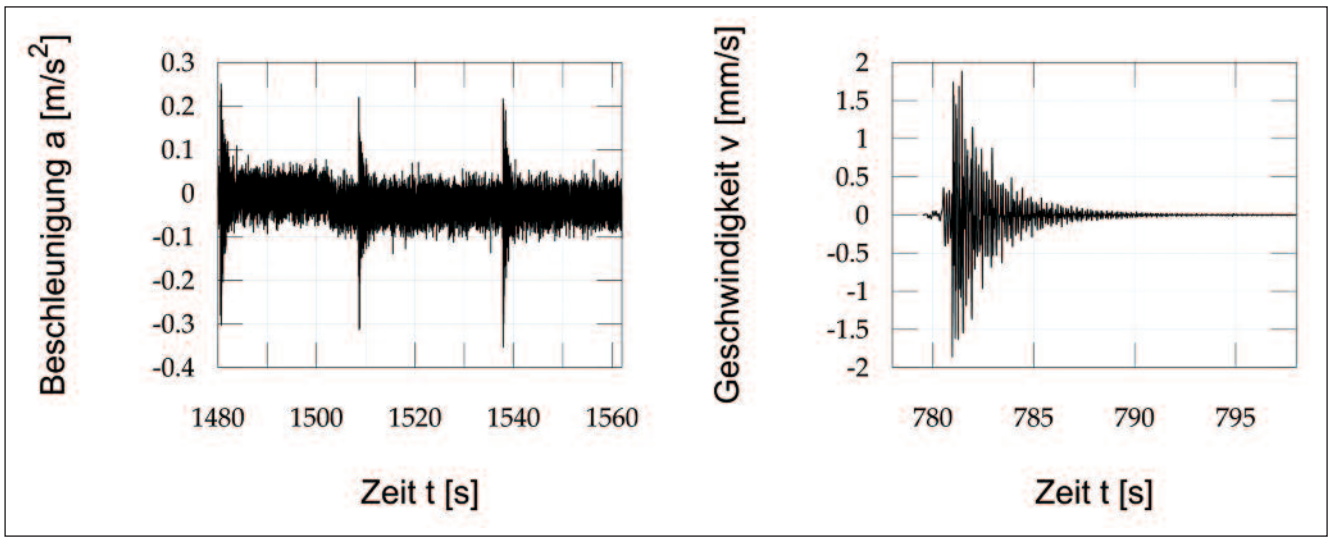

Abb. 27: Konfiguration 1, Messpunkt 6: Antwortsignale des Smartphones Nexus 7 (links: Anregung dreimal springen) und des SMS (rechts: Anregung einmal springen)

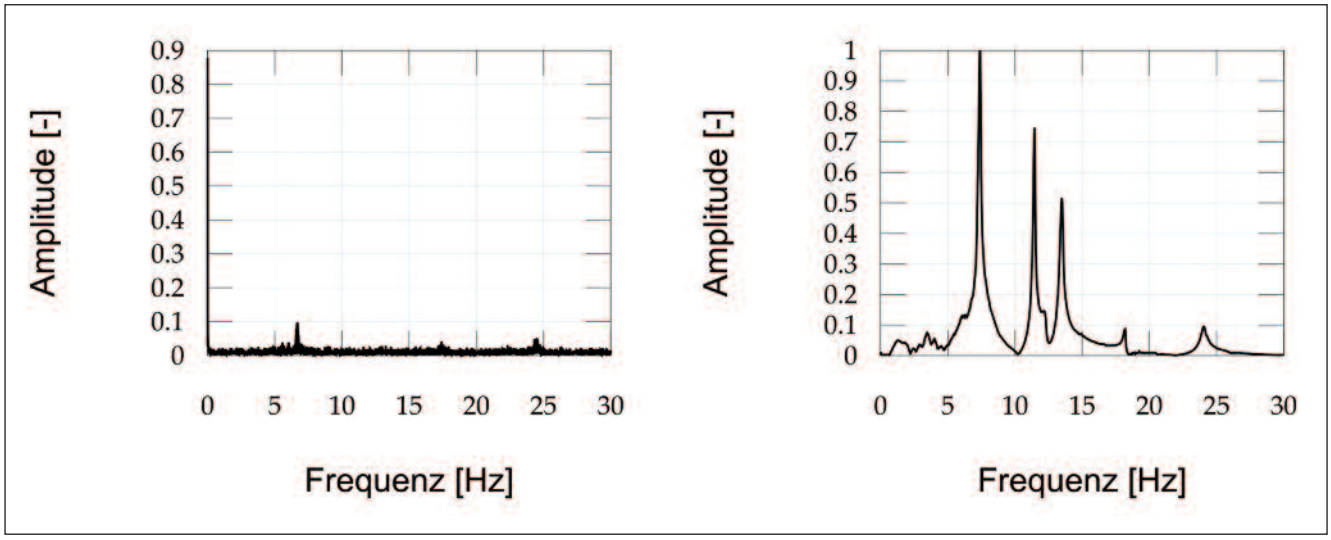

Abb. 28: Konfiguration 1, Messpunkt 6, Auswertung der Schwingungsmessung an der Versuchsbrücke: Frequenzspektrum des Nexus 7 (links) und des SMS (rechts)

Durch die Auflagerung der Stahlhauptträger in den Punkten 3, 4, 7, 8, 11 und 12 **(Abb.26)** wurde eine vierfeldrige Brücke erzeugt. Das so entstandene statische System wurde als Ausgangssystem angenommen. Neben dieser Konfiguration 1 wurden weitere Konfigurationen durch das Entfernen von Stützen erzeugt. In der Konfiguration 2 wurde die Stütze an Punkt 4 entfernt. In Konfiguration 3 wurde zusätzlich die Stütze an Punkt 7 entfernt. Zuletzt wurden die Schwingungen der Brücke in Konfiguration 4 gemessen, bei der die Stützen an den Punkten 4, 7 und 12 entfernt wurden. Bei diesem Versuch wurden für das klassische SMS fünf Geophone eingesetzt. An den Punkten 6 und 9 wurden jeweils dreikanalige Geophone angebracht. An den Punkten 4, 7 und 12 wurden jeweils einkanalige Geophone eingesetzt, wobei an den Punkten 7 und 12 die horizontalen Schwingungen, am Punkt 4 die vertikalen Schwingungen gemessen wurden. Alle elf vorhandenen mobilen Geräte wurden auf der Brücke verteilt **(Abb. 26)**. Dabei handelte es sich um fünf Smartphones und sechs Tablets. Es wurde immer durch eine Person angeregt, wobei die Anregungsarten „gehen", „laufen" und „springen" unterschieden wurden. Jeder Messdurchgang enthielt alle Anregungsarten, wobei „springen" immer in der Fahrbahnmitte in jedem Achtelspunkt der Gesamtlänge durchgeführt wurde. Das entspricht einer Anregung in Feldmitte der vier Felder (Konfiguration 1).

In **Abb. 27** sind die Antwortsignale des klassischen SMS und des Tablets Asus Nexus 7 gegenübergestellt, die in der Versuchskonfiguration 1 an Punkt 6 in vertikaler Richtung aufgezeichnet wurden. Die Anregung erfolgte in den in **Abb. 27** gezeigten Ausschnitten durch „springen". Die aus den dargestellten Signalen ermittelte vorherrschende Frequenz beträgt für das klassische SMS 7,38 Hertz und für das Tablet 7,10 Hertz. Mit der Software SOFiSTiK [38] wurde für die Validierung der Messergebnisse ein FE-Modell der Brücke erstellt. Die erste Eigenfrequenz, die mit dem numerischen Modell für die Konfiguration 1 berechnet wurde, beträgt 7,88 Hertz. Auch hier zeigen die Auswertungen der Messungen untereinander und mit dem FE-Modell ausreichend gute Übereinstimmungen. Die Frequenzen, die mit den Aufzeichnungen der mobilen Geräte ermittelt wurden, beinhalten einen Anteil an Rauschen. Dies lässt sich in der geringeren Ausprägung der Maxima im Frequenzspektrum und dem großen Amplitudenanteil

Abb. 29: Stahl-Bogen-Brücke über den Fluss Lesum in Bremen

der 0-Hertz-Frequenz erkennen **(Abb. 28)**. Mit abnehmender Steifigkeit des Systems verringert sich der Anteil des Rauschens.

Die Frequenzänderungen aufgrund der Systemänderungen in den unterschiedlichen Konfigurationen konnten sowohl mit dem SMS als auch mit den mobilen Geräten aufgenommen werden. Eine signifikante Systemänderung ist folglich auch mit mobilen Geräten wie Smartphones und Tablets messbar.

Bei der Auswertung dieser Versuche konnte ein weiterer Einflussparameter ermittelt werden. Er hängt mit der Funktionsweise der mobilen Android-Geräte zusammen. Die Softwareschnittstelle zu den Sensoren, die abhängig vom Betriebssystem ist, bringt neben dem Vorteil einer Schnittstelle einen Nachteil mit sich. Durch eine softwareseitige Reduzierung der Energiezufuhr bei Smartphones unterliegt die Abtastrate der Sensoren Schwankungen. Das ist bei jedem Smartphone der Fall. Die Schwankung der Abtastrate ist wesentlich stärker als bei klassischen Schwingungsmesssystemen. Bei den vorliegenden Messungen liegt die untere Grenze der Abtastrate bei 90 Hertz. Sofern im Smartphone Prozesse durchgeführt werden, die vom Betriebssystem eine höhere Priorität bekommen (zum Beispiel bei einer Bereinigung des Arbeitsspeichers), werden andere Prozesse, wie die Sensorabtastung, reduziert. Diese Vorgaben werden vom Hersteller des Betriebssystems im Android Compatibility Definition Document (CCD) benannt. Das Dokument sagt jedoch auch, dass mit steigender Android-Version die Anforderungen an die Sensoren steigen. Damit eignen sich neuere Geräte zunehmend für die hier vorliegende Anwendung.

(Eine genaue Darstellung aller Ergebnisse und der Vergleich der Konfigurationen erfolgt ebenfalls in der weiter oben erwähnten, noch nicht veröffentlichten Arbeit.)

Neben den hier beschriebenen Versuchen, die von einer vierfeldrigen Brücke ausgingen (Konfiguration 1), wurden bereits zu einem früheren Zeitpunkt Messungen an der Versuchsbrücke durchgeführt. Dabei wurde die Brücke zunächst in ein zweifeldriges System mit gleichen Stützweiten modifiziert (Unterstützung in den Punkten 7 und 8). Anschließend wurden zwei weitere Konfigurationen gemessen. Konfiguration 2, in der die erste Stütze (Punkt 7) entfernt wurde, und Konfiguration 3, in der die zweite Stütze (Punkt 8) entfernt wurde. Für die Ergebnisse dieser Messungen an der Versuchsbrücke wird auf [39] verwiesen.

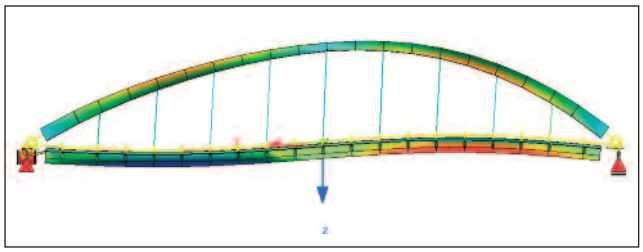

Abb. 30: 3D-FE-Modell der Stahl-Bogen-Brücke über den Fluss Lesum in Bremen, 1. Eigenmode, 2,404 Hertz

3.2.4 Lesum-Brücke Bremen

Die stählerne Bogenbrücke über den Fluss Lesum in Bremen, die im Jahr 2013 erbaut wurde, ist ein weiteres geeignetes Untersuchungsobjekt **(Abb. 29)**. Die Lesumbrücke hat eine abgehängte orthotrope Fahrbahnplatte und überspannt 70,50 Meter. Die orthotrope Fahrbahnplatte weist ein deutlich erfassbares Schwingungsverhalten auf.

Bei der Messung kamen folgende Sensoren zum Einsatz: Zwei dreikanalige Geophone, als Bestandteil des klassischen SMS, und zwei Samsung Galaxy A3 (Smartphones). Sie wurden in den Drittelspunkten der Brücke (23,5 und 47 Meter) neben den Hauptträgern in den Achsen der Bögen platziert. Die Drittelspunkte wurden gewählt, weil an diesen Stellen die erste und die zweite Eigenfrequenz mit möglichst großer Amplitude zu messen sind. Die Anregung fand nur durch den Normalverkehr statt. Diese Art der Anregung wurde bereits mehrfach untersucht [40], [41], [42]. Zur Validierung der Messergebnisse wurde mittels der Bauwerksunterlagen ein detailliertes numerisches dreidimensionales FE-Modell der Brücke erstellt **(Abb. 30)**. Dabei konnte auf die Unterlagen der statischen Berechnung sowie auf die Ausführungsplanung der Brücke zurückgegriffen werden. (Hierfür wird dem Amt für Straßen und Verkehr der Stadt Bremen gedankt, das die Daten zur Verfügung gestellt hat.) Das FE-Modell entspricht somit der Brücke gemäß Planung, also dem idealen Ausgangszustand (Soll-Zustand).

Die mit Hilfe des FE-Modells berechneten Eigenfrequenzen des Systems wurden zunächst bewertet und anschließend sortiert. Frequenzen, die eine rein lokale Schwingung an einem Bauteil beschreiben, sind für die weitere Untersuchung nicht von Interesse. Die Auswertung

der Messungen beider Messsysteme (SMS und mobile Geräte) ergab auch hier ein erfolgversprechendes Ergebnis. Die berechnete erste Eigenfrequenz des FE-Modells beträgt 2,404 Hertz. Die korrespondierende Eigenmode zeigt ausschließlich vertikale Knotenverschiebungen (vertikale Eigenmode, siehe **Abb. 30**). Die Auswertung mittels FFT des SMS und der Smartphones ergaben 2,429 beziehungsweise 2,467 Hertz. Auch der zweiten Eigenfrequenz wird eine vertikale Eigenmode zugeordnet. Mit 3,276 Hertz (FEM), 3,55 Hertz (SMS) und 3,54 Hertz (Smartphone) zeigen alle Frequenzwerte eine gute Übereinstimmung. Selbst höhere Frequenzen bis zu 20,21 Hertz (FEM: 20,475 Hertz) konnten bei der Anregung durch Normalverkehr aus den Messungen mit den Smartphones ermittelt werden.

Da das FE-Modell auf Basis der Planung entstanden ist, können die berechneten Frequenzen als Referenzwerte für eine ideale Brücke gesehen werden. Wie oben beschrieben wurde, zeigen die Vergleichswerte, die aus den Zeitspektren der Schwingungsmessungen ermittelt wurden, eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten des FE-Modells. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass das Tragwerk sich aktuell im Soll-Zustand befindet. Diese Ergebnisse wurden in [43] im Detail dargestellt.

3.3 Folgerungen aus den Schwingungsmessungen mit mobilen Geräten

Mit Hilfe dieser und weiterer Vergleichsuntersuchungen konnte die grundsätzliche Eignung der mobilen Geräte für Schwingungsmessungen nachgewiesen werden. Anwendungsgrenzen für mobile Geräte können sich ergeben, wenn die Steifigkeit der Brücken sehr hoch ist. Sofern die Brücke zu steif und die Anregung nicht intensiv genug ist, sind mobile Endgeräte nicht mehr sensitiv genug, um die geringe Schwingung des Tragwerkes aufzuzeichnen. Hier stellt sich die Frage, ob und wie durch eine höhere Anzahl an Sensoren dieser Nachteil ausgeglichen werden kann.

Wesentlich für eine Schadensindikation ist, dass ausreichend viele Basisinformationen über den Referenzzustand der Brücke vorhanden sind. Diese Informationen können aus numerischen Modellen oder vorhergehenden Messungen gewonnen werden. Nur mit belastbaren Referenz- beziehungsweise Vergleichswerten können die Abweichungen zuverlässig erkannt und entsprechend beurteilt werden. Des Weiteren ist bei der Schadensindikation mittels Schwingungsmessung zu bedenken, dass durch Eigenfrequenzen nur integrale Informationen zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zu differentiellen Informationen, reagieren integrale Informationen wenig sensibel auf lokal begrenzte Systemänderungen, sofern sich diese nicht am Haupttragsystem befinden. Die Wahl und der Aufbau von Monitoring-Systemen sind darauf mit großer Sorgfalt abzustimmen.

In der laufenden Forschungsarbeit sollen mit Hilfe von Sensornetzwerken neben Eigenfrequenzen auch Eigenmoden aufgezeichnet werden. Damit könnten Schäden am Haupttragsystem von Brücken identifiziert und lokalisiert werden, die mit klassischen Sensoren nur sehr aufwändig und kostenintensiv durchgeführt werden können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ist die aktuelle Bauwerksprüfung in Zeiten von Big-Data noch zeitgemäß? Dies ist die zentrale Frage, der in dieser Arbeit nachgegangen wird. Es konnten neue Methoden der Bauwerksprüfung und des Monitorings und der Einsatz von UAV und Smartphones gezeigt werden. Die vorgestellten Beispiele zeigen, dass diese neuen Werkzeuge und Verfahren ein großes, zukunftsweisendes Potential besitzen. Die heutigen Rechnerleistungen erlauben die Erstellung großer, realitätsnaher photogrammetrischer Modelle, die einen hohen Detailgrad aufweisen, und deren zielgerichtete Umwandlung in numerisch berechenbare Modelle möglich ist. Die visuelle Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 kann mit Hilfe einer instrumentierten Drohne durchgeführt werden. Hierbei ist die Erstellung einer photogrammetrischen Punktwolke möglich. Damit kann eine Zuordnung der auf Fotos dokumentierten Schäden bezüglich des Ortes am Bauwerk erfolgen. Die Punktwolke bildet den Ist-Zustand ab und kann als Referenz für zeitlich versetzte Bauwerksprüfungen dienen. Somit lassen sich Deformationen des Tragwerks feststellen, die zwischen zwei Bauwerksprüfungen entstanden sind. Auf Basis dieser Punktwolken lassen sich realitätsnahe FE-Modelle erstellen, die bei einer Nachrechnung verwendet werden können. Ebenfalls ist es durch die heutige Technologie möglich, Sensornetze aufzubauen, die in sich geschlossen sind. Die Nutzung von Smartphones in der Schwingungsanalyse ist vor allem durch die direkte Verknüpfung von Recheneinheit und Sensor eine praktikable Option. Durch ein Sensornetz, das die Tragstruktur überwacht, lassen sich Bauwerksprüfungen aus besonderem Anlass initiieren, wenn ein festgelegter Grenzwert überschritten wird.

Anhand von Versuchen sind die dargestellten Verfahren und Technologien getestet und die erzielten Ergebnisse erläutert worden. Hierdurch werden Möglichkeiten der Implementierung in die heutige Bauwerksprüfung aufgezeigt. Vor allem die Häufigkeit und die Art der Inspektionen lassen sich unter diesen Aspekten neu evaluieren, und sie führen zu einer größeren Wirtschaftlichkeit.

Die lückenlose und kontinuierliche Erfassung und die Bewertung von Bauwerken werden durch diese Methoden vorangetrieben und erzeugen somit verlässliche Datensätze über den Ist-Zustand. Diese können auf Grund der generierten digitalen Modelle als Referenzwerte für nachfolgende Bauwerksprüfungen verwendet werden. Dadurch lassen sich Änderungen zielgerichteter und frühzeitiger detektieren. Die digitale Erfassung führt zu einer Digitalisierung von Bestandsbauwerken und bietet damit einen Eingang in das Building-Information-Modeling. Die mittels Sensoren und Drohnen erzeugten Daten können über die Lebensdauer eines Bauwerks in diesen digitalen Modellen gesammelt und aktualisiert werden. Somit werden Änderungen im Laufe der Nutzungsdauer konsequent dokumentiert.

Unsere Antwort auf die zu Beginn dieses Abschnitts gestellte Frage lautet somit: „Nein. Das aktuelle Vorgehen der Bauwerksprüfung und Dokumentation ist in den Zeiten von Big-Data nicht mehr zeitgemäß."

5 Literaturverzeichnis

[1] F. von Rziha: Die Steinerne Brücke bei Regensburg. Allgemeine Bauzeitung, 1878, S.35-40

[2] A. Borrmann, O. Fischer, G. Dori u. M. Wild: Intelligente Brücke – Konzept eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt, Heft B 104, 2014

[3] M. Schnellenbach-Held, M. Peeters u. F. Miedzinski: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt, Heft B 110, 2015

[4] F. Sawo, V. Klumpp u. F. Beutler: Intelligente Bauwerke – Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt, Heft B 114, 2015
[5] R. Schneider: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt, Heft B 117, 2015
[6] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten. Dokumentation 2013
[7] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung. Deutsche Norm, Normenausschuss Bauwesen im DIN, Ausgabe 11/1999
[8] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING)
[9] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach Din 1076 (RI-EBW-PRÜF), 25.03.2013
[10] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA), Ausgabe 2004
[11] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ), Ausgabe 2004
[12] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie für die Erhaltung des Korrosionsschutzes von Stahlbauten (RI-ERH-KOR), Ausgabe 2005
[13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING), Ausgabe 2008
[14] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinien für die bauliche Durchbildung und Ausstattung von Brücken zur Überwachung, Prüfung und Erhaltung (RBA-BRÜ), Ausgabe 1997
[15] U. Freundt, R. Vogt, S. Böning u. D. Michael: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt, Heft B 106, 2014
[16] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten. Bundesanzeiger Verlag, 2017
[17] G. Morgenthal, N. Hallermann u. M. Achtelik: Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken. Frauenhofer IRB-Verlag, F 2971, 2015
[18] N. Hallermann, G. Morgenthal u. V. Rodehorst: Vision-based monitoring of heritage monuments – Unmanned Aerial Systems (UAS) for detailed inspection and high-accurate survey of structures. 14th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, 2015
[19] G. Morgenthal u. N. Hallermann: Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Based Visual Inspection of Structures. Advances in Structural Engineering, 2014
[20] N. Hallermann, G. Morgenthal u. V. Rodehorst: Vision-based deformation monitoring of large scale structures using Unmanned Aerial Systems. Proceedings IABSE Symposium Madrid, 2014
[21] N. Hallermann, G. Morgenthal u. V. Rodehorst: Luftbild-gestützte automatisierte Schadenserkennung an Betonoberflächen. 2. WTA-Kolloquium Betoninstandhaltung, 2015
[22] V. Haaf: Bildanalyse zur Erkennung und Vermessung von Betonrissen. Bachelorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2015
[23] N. Hallermann, G. Morgenthal, J. Kersten u. V. Rodehorst: Von der Bauwerksbefliegung mit UAS zu hochauflösenden Geometriemodellen. Messen im Bauwesen 2017
[24] J. Albertz u. M- Wiggenhagen: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. Wichmann, Berlin 2009
[25] ASPRS; https://www.asprs.org/organizatio n/what-is-asprs.html (26.Feb.2018)
[26] M. Garsch, T. Hertle, A. Wehner, J. Pimpi u. N. Gebbeken: Scanning of Existing Structures – an Entry for BIM. Proceedings IABSE Symposium Nantes, 2018
[27] F. Remondino: State of the art in high density image matching. The Photogrammetric Record. Trento: Bruno Kessler Foundation, 2014
[28] N. Snavely, S. M. Seitz u. R. Szelinski: Modeling the World from Internet Photo Collections. International journal of computer vision; Springer, 2008
[29] B. Bussmann: Untersuchung der Möglichkeit der telepräsenten Datenerfassung für die Einstufung von Straßenbrücken für militärische Lasten. Masterarbeit, Universität der Bundeswehr München, 2017
[30] CloudCompare; https://cloudcompare.org
[31] F. Stahl: Vergleich flächenhafter Messverfahren zur Bestandsdokumentation am Beispiel einer Brücke. Masterarbeit, Universität der Bundeswehr München, 2018
[32] O.S. Salawu: Detection of structural damage through changes in frequency: a review. Engineering structures 19.9 (1997):718-723
[33] J. Meack, M. Abdel Wahab u. G. De Roeck: Damage detection in reinforced concrete structures by dynamic system identification. Proceedings of the international seminar on modal analysis 2.1 (1999) 939–946
[34] D. Zonta: Structural damage detection and localization by using vibrational measurements. Dissertation, Strutture, dei Trasporti delle acque, Bologna, Gennaio, 2000
[35] V. Zabel: Applications of wavelet analysis in system identification. Ph.D. dissertation, Institute for structural mechanics, Bauhaus University Weimar, 2003
[36] Q. Kong, Y.-Q. Kwony, L. Schreierz, S. Allen, R. Allen u. J. Strauss: Smartphone-based networks for earthquake detection. Innovations for Community Services (I4CS), 2015 15th International Conference on IEEE, 2015
[37] C. Petersen: Dynamik der Baukonstruktionen. Vieweg, Braunschweig, 2000
[38] SOFiSTiK AG; http://www.sofistik.com
[39] M. Benndorf, M. Garsch, T. Haenselmann, N. Gebbeken u. I. Videkhina: Mobile bridge integrity assessment. in Sensors. IEEE, 2016.
[40] C. R. Farrar u. G. H. James III: System identification from ambient vibration measurements on a bridge. Journal of Sound and Vibration, vol. 205, no. 1, pp. 1–18, 1997.
[41] Y.-B. Yang, C. Lin, J. Yau: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle. Journal of Sound and Vibration, vol. 272, no. 3, pp. 471–493, 2004.
[42] W.-H. Wu, S.-W. Wang, C.-C. Chen u. G. Lai: Mode identifiability of a cable-stayed bridge under different excitation conditions assessed with an improved algorithm based on stochastic subspace identification. Smart Structures and Systems, vol. 17, no. 3, pp. 363–389, Mar. 2016.
[43] M. Benndorf, M. Garsch, C. Mueller, T. Fromm, T. Haenselmann, N. Gebbeken, T. Luczynski u. A. Birk: Robotic Bridge Statics Assessment Within Strategic Flood Evacuation Planning Using Low-Cost Sensors. in SSRR. IEEE, 2017