

Forschung mittels digitaler Bildkorrelation am Prüfamts für Verkehrswegebau der TU München

Seit Anfang 2019 wird am Prüfamts für Verkehrswegebau mit digitaler Bildkorrelation (engl.: digital image correlation, kurz: DIC) geforscht. Nach einer Einführung in das innovative Messverfahren werden an Beispielen die Funktionsweise sowie Stärken und Entwicklungspotenziale der Methode erläutert. DIC ist ein weiterer Schritt in Richtung Digitalisierung des Eisenbahnoberbaus.



1. Einleitung in Kameramessungen mit DIC

1.1. Allgemeines

Die digitale Bildkorrelation beschreibt den digitalen Abgleich von Bildern mit dem Ziel, daraus im Idealfall hochgenaue, messbare Ergebnisse zu erhalten. Neben der Auswertemethodik der Bildinformationen ist die Voraussetzung die eigentliche Bilderfassung. Gängige Systeme unterscheiden sich vor allem in der Bildqualität, der Benutzerfreundlichkeit und im Preis, das Prinzip dahinter bleibt im Wesentlichen gleich. Einfache 2D-Systeme auf Basis von Industriekameras können dabei schon sehr preiswert grobe Aussagen liefern. Dem gegenüber stehen hochauflösende 3D-Systeme mit sehr schnellen Abtastraten, für welche Anschaffungskosten im sechsstelligen Bereich notwendig sind. Sowohl preislich als auch qualitativ entscheidend ist außerdem die verwendete Auswertesoftware.

Folgende Messgrößen können mittels DIC erfasst werden:

- Verschiebungen
- Verformungen
- Dehnungen gesamter Oberflächenbereiche
- Geschwindigkeiten und Beschleunigungen
- Schwingungsanalysen von Punkten oder Oberflächen

1.2. Funktionsweise

Über Kameras werden Bilder des Messobjektes erfasst und als 8-Bit Graustufenbild gespeichert. Ein Bild wird als Referenzbild festgelegt und alle weiteren Bilder der Messsequenz mit diesem Bild verglichen. Hierzu werden vom Nutzer Punkte oder Bereiche ausgewählt und die Messgrößen anhand der Änderungen in den Bildsequenzen ausgewertet. Grundlage dafür sind Grauwertmuster auf Pixelebene, die zu größeren Bereichen zusammengefasst werden. Durch die 8-Bit Bilder können je Pixel 256 Graustufen erfasst werden. Aufgabe der Software ist es, das Muster aus dem Referenzbild in den folgenden Bildern der Messsequenz wieder zu finden. Hierzu werden die Signalinformationen zuerst in den Fourier-Raum transformiert und anschließend die Regionen mit der höchsten Übereinstimmung gesucht. Im finalen Schritt muss die gewonnene Information wieder auf das reale Bild übertragen werden, um dort die neue Position zu markieren. [1]

Durch die Verwendung von geklebten Messpunkten können Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erfasst werden. Die Messung von Dehnungen und Formänderungen ganzer Bauteiloberflächen kann mittels eines meist aufgespritzten Zufallsmusters durchgeführt werden.

Zur Datenerfassung und vor allem zur Auswertung der großen Datenmengen



Prof. Dr.-Ing.

Stephan Freudenstein

Technische Universität München
Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau
stephan.freudenstein@tum.de



Matthias Pittrich, MSc.

Technische Universität München
Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau
matthias.pittrich@tum.de

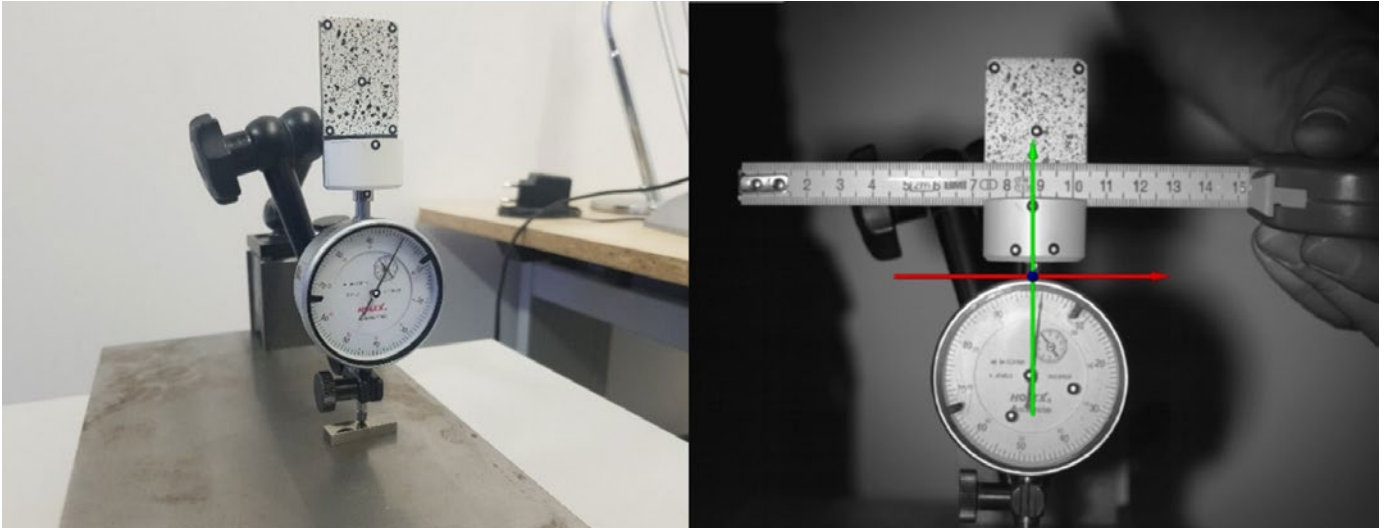


Dr.-Ing. Walter Stahl

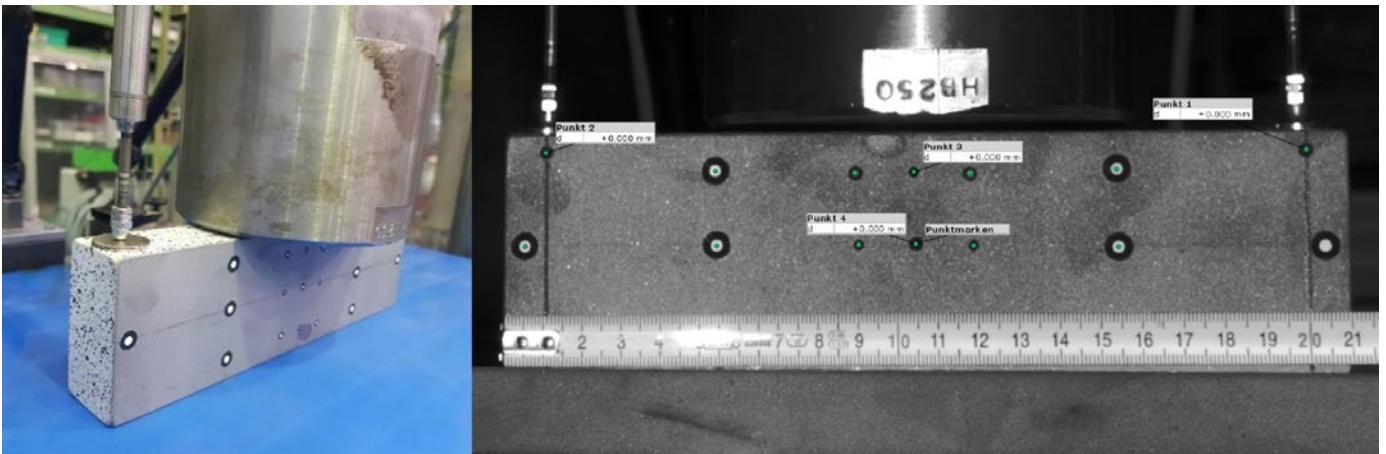
Akademischer Direktor
Technische Universität München
Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau
walter.stahl@tum.de

ist ein Hochleistungsrechner notwendig. Um den Datenumfang zu reduzieren oder die Messfrequenz zu erhöhen, gibt es auch die Möglichkeit, den Bildausschnitt zu verkleinern oder die Auflösung herabzusetzen. Selbst mit diesen Hilfsmitteln können Messdateien schnell eine Größe von mehreren Gigabyte erreichen.

Anders als bei herkömmlichen Messsystemen, bei dem das Messgerät im Regelfall kalibrierte Messgrößen wiedergibt,



1: Statischer Versuchsaufbau zum Abgleich der Messgenauigkeit [2]



2: Dynamischer Versuchsaufbau zum Abgleich der Messgenauigkeit [2]

muss bei einem Kamerasystem für fast jeden Anwendungsfall eine neue Kalibrierung durchgeführt werden. Bei 2D-Systemen genügt es dabei, das Bild scharf zu stellen und einen Maßstab gut sichtbar in der Messebene zu positionieren. Auf Basis dieses Referenzmaßes werden alle weiteren Maße im Bild berechnet. Bei einem 3D-System gestaltet sich die Kalibrierung aufwendiger. Es sind genügend Referenzmaße im Raum zu definieren, um die innere und äußere Orientierung des Stereokamerasystems zu berechnen, damit die Software an jeder Stelle des definierten Messvolumens die gesuchten Messgrößen auswerten kann.

Bei guten Sicht- und Lichtverhältnissen erkennt die Software die applizierten Messpunkte automatisch. Nicht direkt erkannte Messpunkte können oft noch manuell selektiert und hinzugefügt werden. Es kommen leuchtstarke LED-Scheinwerfer zum Einsatz, die dafür sorgen, dass während

der gesamten Messung möglichst gleichbleibende Lichtverhältnisse herrschen. Beim Einsatz des Messsystems unter freiem Himmel mit stark wechselnden Lichtverhältnissen ist entsprechende Erfahrung im Umgang mit dem System erforderlich, um zu brauchbaren Ergebnissen zu gelangen.

2. DIC am Prüfmittel für Verkehrswegebau

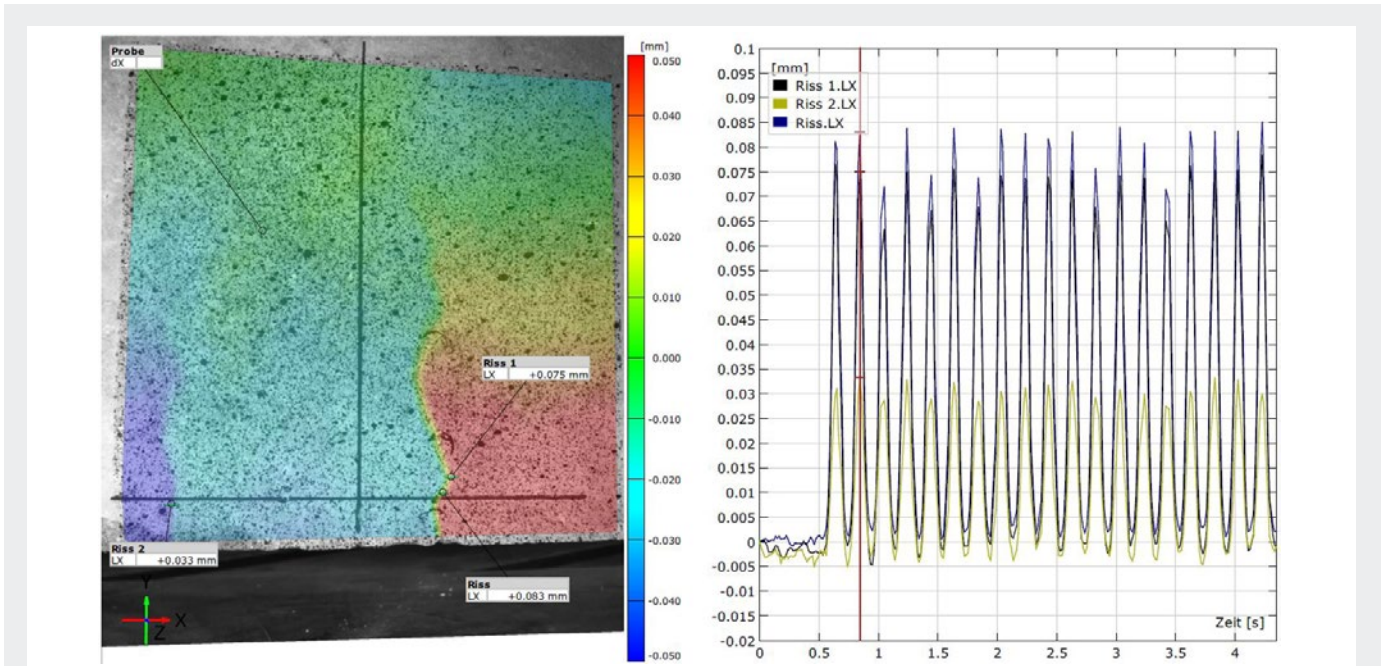
2.1. Erste Schritte

Der Einstieg in das Thema DIC erfolgte mit einem 2D-System der Firma „Me-go“, welches Anfang 2019 in Betrieb genommen wurde. Initial wurden einige Vergleichsversuche mit bereits bestehender Messtechnik vorgenommen, um zu erkennen, in welchen Bereichen das Kamerasystem Stärken aufweist und wo Grenzen in der Anwendbarkeit bestehen.

Beispielsweise wurde eine Hundertstel Messuhr am oberen Ende des Mess-

Pins mit einer Kunststoffplatte ausgestattet (Bild 1). Unter die fest montierte Messuhr wurden dann Endmaße mit definierten Abmessungen gelegt. Mit der Kamera wurden parallel dazu Messpunkte aufgezeichnet, welche sich auf der an der Messuhr befestigten Kunststoffplatte befanden. Somit war ein direkter Vergleich zwischen bekannter Dimension des Endmaßes, Anzeigewert der Messuhr und Auswertegröße der DIC-Software möglich.

Weiter wurden dynamische Versuche durchgeführt. Hierzu wurde ein Stahlquader auf eine hochelastische Kunststoffunterlage gelegt und mit einer Frequenz von 10Hz dynamisch belastet (Bild 2). Auf der zur Kamera gerichteten Seitenfläche befanden sich Messpunkte; vergleichend wurden die Wege mit Induktivwegaufnehmern (LVDT) gemessen. Beide Tastversuche zeigten eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse.



3: Dynamische Rissuntersuchung an einer Spannbetonschwelle (2D, 5 Megapixel) [eigene Abbildung]

2.2. Vom Labor ins Feld

Neben dem Einsatz des Systems unter Laborbedingungen sollte der Anwendungsbereich bei Feldmessungen erprobt werden. Hier spielen vor allem die Witterungs- und Lichtbedingungen eine entscheidende Rolle. Ab einer bestimmten Windstärke kann es zu Messfehlern durch Bewegungen der Kamerastative kommen. Hier besteht jedoch die Möglichkeit, eine rechnerische Korrektur mittels einer Starr-

körperkompensation durchzuführen. Bei sehr stark schwankenden Lichtverhältnissen kann die Einsatzfähigkeit des Systems eingeschränkt sein.

Für Vergleichsmessungen kamen die am Prüfmatt verwendeten Induktivwegaufnehmer (LVDT) zum Einsatz. Zusätzlich wurde ein 3D-System getestet, um auch dessen Tauglichkeit für Feldmessungen zu verifizieren. Zwischen allen drei Messsystemen konnten sehr gute Übereinstimmungen mit mittleren Ab-

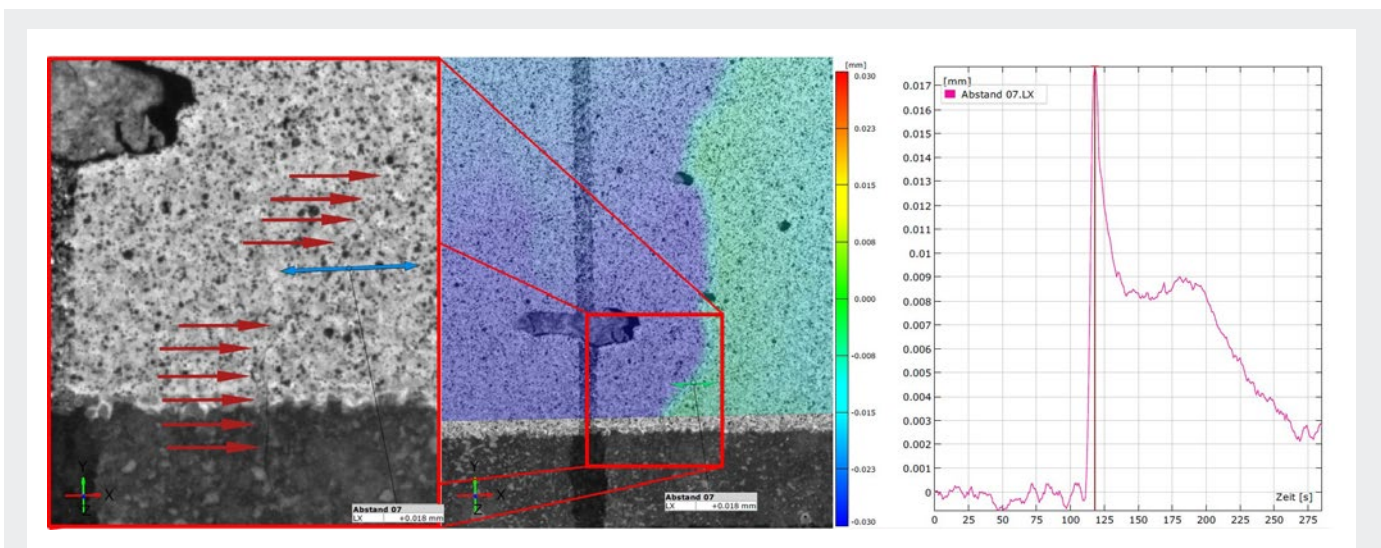
weichungen von etwa 0,1mm erreicht werden. [3]

Mittlerweile verfügt das Prüfmatt für Verkehrswegebau über zwei 2D-Systeme sowie ein 3D-System.

3. Anwendungsbeispiele

3.1. Labormessung

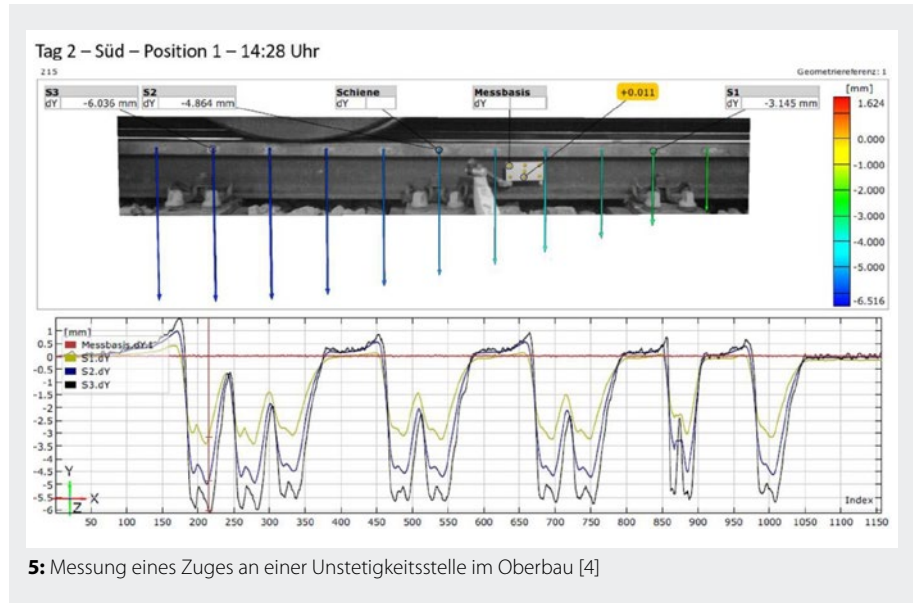
Ein klassischer Anwendungsfall ist die Rissuntersuchung an Betonbauteilen, hier



4: Statische Rissuntersuchung an einer Spannbetonschwelle (2D, 65 Megapixel) [eigene Abbildung]

am Beispiel einer Spannbetonschwelle im 3-Punkt Biegeversuch gemäß DIN EN 13230-2:2016, welche über die Anforderungen der Norm hinaus mittels DIC untersucht wurde. Während man mit einem Dehnmessstreifen (DMS) nur in einem kleinen Bereich die Dehnungen messen kann, so ist es mittels der aufgenommenen Bild-daten möglich, die gesamte mittels Zufalls-muster vorbereitete Fläche zu analysieren (Bild 3). Ein Sprühmuster erlaubt im Gegen-satz zu einzelnen aufgeklebten Messpunk-ten eine flächige Analyse.

Auf der linken Seite von Bild 3 sind mit-els Augmented Reality Falschfarben auf die reale Schwellenoberfläche projiziert worden, so dass Bewegungen in lokaler x-Richtung sichtbar werden. Grünliche Be-reiche bewegen sich dabei kaum aus der Ursprungslage, blaue Bereiche bewegen sich in negative x-Richtung und rote Be-reiche in positive x-Richtung. Die vertikale schwarze Linie markiert die Mittelachse der Lasteinleitung, somit entsprechen die Verformungen prinzipiell der Biegetheo-



rie. Klar ersichtlich sind die abrupten Farb-wechsel an zwei Stellen, die zeigen, dass hier ein Riss durch das Bauteil verläuft. Mit-els virtuell aufgebracht er Extensometer

lassen sich nun an den Stellen „Riss“, „Riss 1“ und „Riss 2“, Bewegungen in x-Richtung graphisch darstellen. Dabei ist ersichtlich, dass sich der gelb dargestellte „Riss 2“ bei

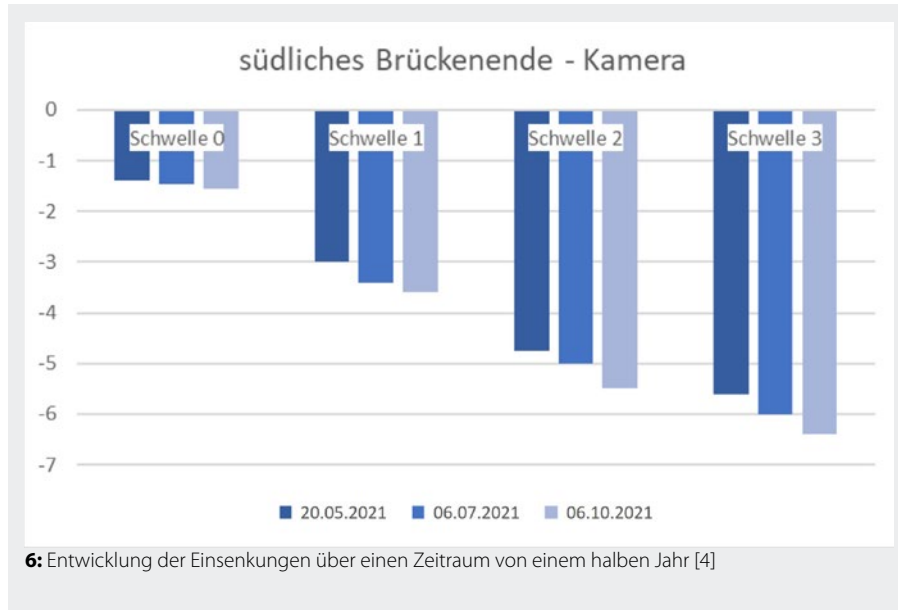


ALBERT FISCHER GmbH
 Heilswannenweg 53 ■ 31008 Elze
 Tel. 05068 / 9290-0 ■ Fax -40
 info@albert-fischer.de
 www.albert-fischer.de

- Gleis- und Stadtbahnbau
- Hallen- und Industriebau
- Erd- und Bahnsteigbau
- Straßen- und Kanalbau
- Ingenieur- und Wasserbau



Albert Fischer GmbH – Alle Bauleistungen aus einer Hand!



6: Entwicklung der Einsenkungen über einen Zeitraum von einem halben Jahr [4]

maximaler Belastung auf 0,03 mm öffnet. Die beiden Extensometer „Riss“ (blau) und „Riss 1“ (schwarz) zeigen, dass die Rissbreite von 0,083 mm auf 0,075 mm in Richtung der Druckzone abnimmt.

Eine sehr ähnliche Untersuchung zeigt Bild 4. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist identisch zu dem vorherigen Beispiel, allerdings wurde in diesem Fall zu Testzwecken mit einer 65 Megapixel Kamera gemessen. Damit lag die Auflösung 13-mal über der Auflösung der zuvor verwendeten 2D-Kamera. Das extrem große Datenvolumen führt allerdings zu einer deutlichen Reduktion der maximal möglichen Messfrequenz.

Das linke vergrößerte Detail zeigt den Verlauf des Risses, der mit dem Auge kaum noch erkennbar ist. Erneut kann der Rissverlauf mittels Augmented Reality kenntlich gemacht werden. Aufgrund der sehr

hohen Auflösung kann hier eine noch höhere Genauigkeit erreicht werden. Die Grafik rechts im Bild zeigt, dass bei der maximal aufgetragenen Last eine Rissöffnung von 0,018 mm entsteht.

Je nach Messsystem lassen sich auch externe Parameter wie z.B. die Prüfkraft mit aufzeichnen oder CAD-Dateien mit dem Messobjekt verknüpfen, was einen direkten Vergleich mit FE-Simulationen ermöglicht.

3.2. Feldmessung

Auch der Einsatz auf Feldmessungen ist möglich, wobei hier wie erwähnt die Lichtverhältnisse und die Witterung besonders zu beachten sind. Ein Anwendungsfall sind Einsenkungsmessungen am Eisenbahnüberbau. Im Rahmen einer Bachelor-Thesis erfolgten über ein halbes Jahr

verteilt drei Messungen auf einem eingeleigten Abschnitt am Übergang von einer Brücke auf die freie Strecke. Die Messstelle wurde in beiden Richtungen befahren. Eine der aufgenommenen Zugfahrten mit der Fahrtrichtung von Nord nach Süd ist in Bild 5 zu sehen.

Der Zug bestand aus einer vierachsigen Lokomotive BR 218 und vier darauffolgenden Doppelstockwagen. Die Grafik unterhalb zeigt die Verformungsverläufe für die Messpunkte, welche exakt oberhalb der Schwellen „S1“, „S2“ und „S3“ auf dem Schienenkopf angebracht wurden. So lässt sich eine erhebliche Zunahme der Einsenkungen von Schwelle 1 über Schwelle 2 auf Schwelle 3 erkennen. Schwelle 1 liegt dabei am nächsten an der Brücke, Schwelle 3 am weitesten davon weg. Die rote Linie der „Messbasis“ bezieht sich auf die kleine weiße Tafel im aufgenommenen Bild. Diese Tafel wurde am Brückenwiderlager fest montiert, so dass diese Referenz als starr betrachtet werden kann. Das hat zwei Vorteile: Einerseits können somit Bewegungen der Kamera rechnerisch eliminiert werden. Andererseits wird es dadurch möglich, auch nach der Demontage der Kamera und einem erneuten Aufbau ein festes Bezugsobjekt zu haben, sodass zeitlich weit auseinanderliegende Messungen miteinander vergleichbar sind. Die Langzeitbetrachtung mit Messungen, etwa drei und sechs Monate nach der initialen Messung, ist in Bild 6 dargestellt.

Für alle betrachteten Schwellen ist die Zunahme der Einsenkungen über die Zeit erkennbar, was auf Setzungen des Oberbaus schließen lässt. Schwelle 0 ist dabei der letzte Brückenbalken, Schwelle 1 die erste Schwelle nach der Brücke. Die zuvor

Ihr Partner für optische Messtechnik

www.me-go.de

in Kooperation mit:

Me-go

PART OF

#HandsOnMetrology

ZEISS

- ✓ Digitale Bildkorrelation - DIC
- ✓ 3D-Scanning
- ✓ CT-Scanning
- ✓ Reverse Engineering

bereits erwähnte starke Zunahme der Einsenkungen mit zunehmender Entfernung von der Brücke ist auch hier wieder deutlich erkennbar.

Alle gezeigten Beispiele beziehen sich auf Messungen mittels eines 2D-Kamerasystems. Mit dem ebenfalls vorhandenen 3D-System ergeben sich noch zahlreiche weitere Anwendungsfelder, welche in folgenden Veröffentlichungen behandelt werden sollen. Dazu zählen beispielsweise Feldmessungen im Herzstückbereich von Weichen als auch die Betrachtung des Eisenbahnoberbaus während der Durcharbeitung des Oberbaus mit einer Stopfmaschine mit DGS.

4. Fazit

Zusammenfassend ergeben sich für DIC-Systeme folgende Vorteile und Potenziale für die weitere Entwicklung:

Vorteile:

- Gleichzeitige Erfassung zahlreicher Messpunkte oder ganzer Oberflächen
- Messobjekte von wenigen Millimetern bis hin zu vielen Metern messbar
- Augmented Reality zur verständlichen Darstellung komplexer Vorgänge
- Visuelle Kontrollmöglichkeit bei Auffälligkeiten in den Messdaten
- Erweiterbar und auf den konkreten Einsatzzweck anpassbar (2D, 3D, etc.)
- Berührungslose Messung (Sicherheitsabstand, Lichtraumprofil, zerstörungsfrei)
- Leicht zu transportieren, einfacher Aufbau und wenig Platzbedarf

Potenziale zur Weiterentwicklung:

- Sehr große Datenmengen bei Erfassung
- Enorme Rechnerleistung zur Auswertung notwendig
- Hochwertige Systeme sehr kostenintensiv in der Anschaffung
- Feldeinsatz nur bei geeigneten Witterungsbedingungen möglich
- Systeme teilweise wind- und vibrationsanfällig
- Auswertung teilweise etwas aufwendiger als mit bestehenden Messsystemen
- Je nach System nur geringe Abstraten oder Auflösungen möglich

Wie gezeigt, lassen sich DIC-Messsysteme sehr vielseitig einsetzen und erlauben Aussagen, die mit sonst üblichen Messsystemen nicht möglich wären. Durch die Mo-

difizierbarkeit und die sehr variablen Anwendungsmöglichkeiten können die Systeme in nahezu jedem Anwendungsbereich genutzt werden. Am Prüfamt für Verkehrswegebau wird DIC in Zukunft sicherlich weiterverfolgt und angewendet werden.

5. Zusammenfassung

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die digitale Bildkorrelation (DIC) sich unter geeigneten Randbedingungen in vielen Bereichen auf Augenhöhe mit herkömmlichen Messsystemen befindet. Darüber hinaus ermöglicht DIC die Erfassung von weitaus mehr Messgrößen als mit üblichen Sensoren, da gesamte Bereiche analysiert werden können. Man misst, was man sieht und sieht, was man misst. Dies ermöglicht meist ein deutlich verbessertes Systemverständnis. •


Literatur

- [1] Webinar, GOM Metrology, Titel: Get the Best Out of Digital Image Correlation: Theorie und Prinzipien, 03.11.2020.
- [2] Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Masterthesis 161, Fritzel Louis-Jacques Römer, Untersuchung des neuartigen Messverfahrens digitale Bildkorrelation im Vergleich mit bestehender Messtechnik zur Ermittlung von Verschiebung, Verformung und Dehnung, 16.04.2019.
- [3] Fachzeitschrift inVISION, Titel: Digitale Bildkorrelation und Induktivwegaufnehmer im Vergleich - 2D/3D vs. LVDT, Ausgabe 02/2021.
- [4] Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Bachelorthesis 337, Stephanie Hunseder, Vergleichende Untersuchung zweier Übergangskonstruktionen an einer Eisenbahnbrücke, 09.05.2022.

Summary


Research using digital image correlation at the Institute of Road, Railway and Airfield Construction at the TU Munich

Previous investigations have shown that digital image correlation (DIC) is on a par with conventional measurement systems in many areas under suitable boundary conditions. In addition, DIC enables the acquisition of far more measured variables than with conventional sensors, as entire areas can be analysed. You measure what you see and see what you measure. This usually enables a significantly improved understanding of the system.




WWW.LINSINGER.COM



Before



After



Zero Emission - High-performance LINSINGER Rail Milling Technology.

#trusttheinventor

