

Vermessungen im Sub-Millimeter-Bereich

Anwendungsbeispiele aus der Industrie- und Präzisionsvermessung¹



Teil 2

Willfried Schwarz

1 Einleitung

Im ersten Teil des Beitrages, der im Heft 4/2006 dieser Schriftenreihe erschienen ist, wurde ein Überblick über Messverfahren gegeben, die im Bereich der Ingenieurgeodäsie eingesetzt werden können. Es wurden besonders die Leistungspotenziale der Servotachymeter, der Autokollimation, der Laserinterferometrie sowie der Lasertracker herausgestellt. Im anwendungsbezogenen Teil wurde auf die Vermessung bestehender, kreisförmiger Teilchenbeschleuniger sowie auf die Anforderungen zukünftiger Linearbeschleuniger mit einer Länge von ca. 30 km und auf die Weiterentwicklung messtechnischer Technologien für deren Vermessung unter Beachtung der geforderten Genauigkeiten eingegangen. In diesem zweiten Teil des Beitrages soll nun auf den Einsatz der Laserinterferometrie für Kalibrierzwecke und für die Bestimmung von Bauwerksschwingungen sowie auf die Möglichkeiten faseroptischer Sensoren für die Ingenieurgeodäsie eingegangen werden. Außerdem werden die Leistungspotenziale der Industriephotogrammetrie an einigen wenigen Beispielen für die Bereiche des Bauingenieurwesens aufgezeigt.

2 Laserinterferometrie für Kalibrierzwecke

Aufgrund der hohen Messgenauigkeit von $< 1 \mu\text{m}$ und der verhältnismäßig einfachen Handhabung werden Laserinterferometer für Kalibrieraufgaben eingesetzt. Distanzmesser werden auf Messbahnen mit Längen bis zu 30 m, auf denen ein Schlittenverfahren werden kann (Bild 1) und dessen Position interferometrisch mit übergeordneter Genauigkeit bestimmt wird, für den Nahbereich kalibriert.

¹ Diese Veröffentlichung stellt die schriftliche Fassung der unter gleichem Titel am 10.02.2006 in München und am 17.03.2006 in Würzburg im Rahmen der Wintervortragsreihe 2005/2006 des DVW-Bayern e. V. gehaltenen Vorträge dar.



Bild 1: Messbahn zur Kalibrierung von Distanzmessern

Die Bild 2 und 3 zeigen die Ergebnisse für zwei unterschiedliche Distanzmesser. Die Abweichungen zwischen den Messwerten des Distanzmessers (Ist-Werte) und den interferometrisch gemessenen Positionen (Soll-Werte) zeigen im ersten Beispiel (Bild 2) einen zufälligen Verlauf mit einem Bereich von $\pm 0,2$ mm; die Standardabweichung einer Messung mit dem Distanzmesser ist $< 0,1$ mm. Im zweiten Beispiel sind systematische Abweichungen in Form des zyklischen Phasenfehlers mit einer verhältnismäßig kleinen Amplitude von $\pm 0,2$ mm zu erkennen. Werden die Messwerte mit einer aus den Abweichungen berechneten Kalibrierfunktion korrigiert, so können auch bei diesem Distanzmesser Stre-

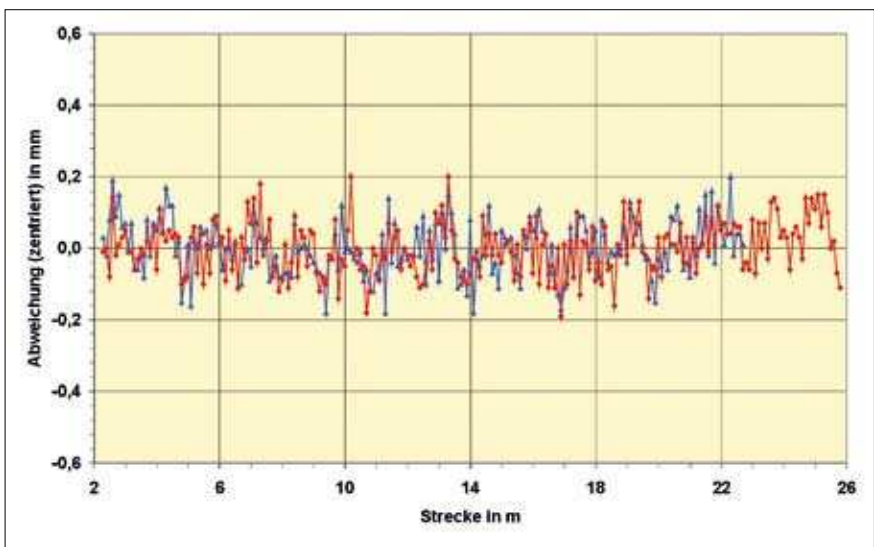


Bild 2: Restverbesserungen bei einem Leica TDM 5000 im Nahbereich

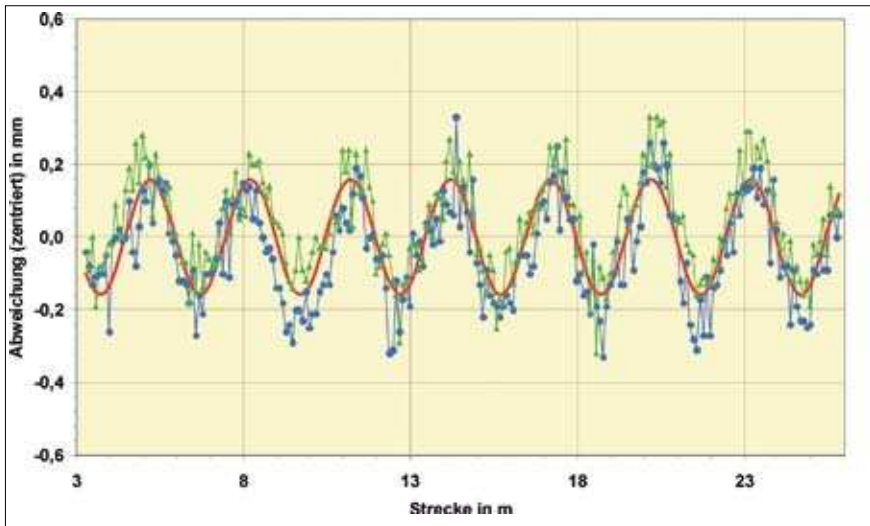


Bild 3: Restverbesserungen bei einem Leica TCA 1800 im Nahbereich

ckenmessungen im Nahbereich mit einer Standardabweichung von $< 0,1$ mm ausgeführt werden.

Auch andere Längenmessgeräte, wie z. B. Messbänder, Wegsensoren usw., lassen sich mit Laserinterferometern einfach kalibrieren. Speziell für die Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten sind eine Reihe von Komparatoren entwickelt worden. Es können die Nivellierlatten in horizontaler (Bild 4), aber auch in der Gebrauchslage, also vertikal (Bild 5), kalibriert werden. Eine Gegenüberstellung der Komparatoren mit ihren jeweiligen Besonderheiten ist in /Schwarz (2005)/ enthalten. Diese Veröffentlichung ist eine von mehreren, aufeinander abgestimmten Beiträgen, die im Rahmen des Runden Tisches »Kalibrierung geodätischer Messmittel« – ein Zusammenschluss einiger Hochschulinstitute Österreichs, der Schweiz und Deutschlands – zum Themenkomplex des Nivellierens mit Digitalnivellieren als Sonderheft in der Fachzeitschrift »Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)« im Heft 6/2005 erschienen sind. Aus dem Runden Tisch ist mittlerweile die »Gesellschaft zur Kalibrierung geodätischer Messmittel e.V. (GKGM)« hervorgegangen. Die Kalibrierung von Präzisionsnivellierlatten gewinnt an Aktualität, da durch den Beschluss der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) das Deutsche Haupthöhennetz ab dem Jahre 2006 u. a. auch durch Präzisionsnivelements erneuert wird.



Bild 4: Horizontalkomparator der Universität der Bundeswehr München
 (Quelle: Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München)

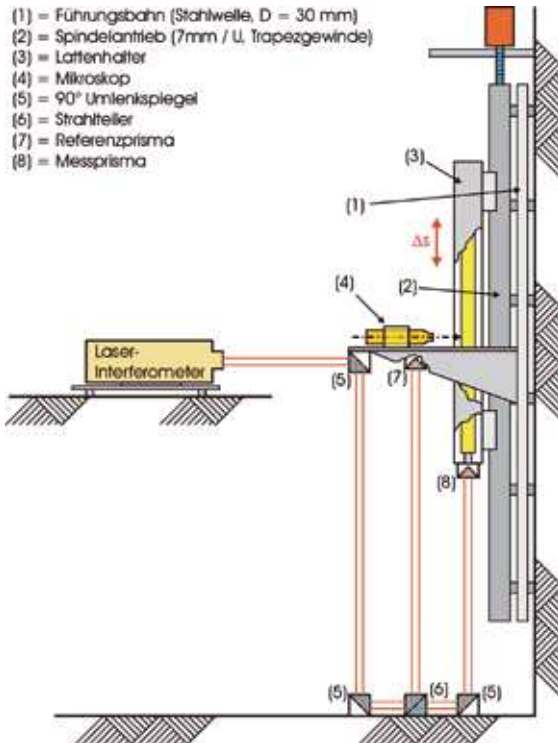


Bild 5: Schematische Darstellung des Vertikalkomparators der Technischen Universität München

3 Schwingungsmessungen

Für die Bestimmung des Schwingungsverhaltens von Brückenbauwerken eignen sich Laserinterferometer dann besonders gut, wenn die durch die Schwingung hervorgerufenen Wegänderungen (in vertikaler Richtung) des Bauwerks im Vordergrund des Interesses stehen. Aufgrund des großen Messbereichs bis zu 30 m benötigen Laserinterferometer keine besondere Messbasis; sie können außerhalb des Einwirkungsbereichs des Bauwerks aufgestellt werden. Mit einem Laserinterferometer können auch über einen längeren Zeitraum von mehreren Minuten die Wegänderungen mit einer Standardabweichung von $< 10 \mu\text{m}$ und mit einer hohen zeitlichen Auflösung von $< 5 \text{ms}$ bestimmt werden /Schwarz 2006b/. Die Messfrequenz ließe sich im Bedarfsfall noch wesentlich erhöhen. Die Messgenauigkeit wird primär durch Veränderungen der meteorologischen Verhältnisse in dem Bereich zwischen Interferometerprisma und Reflektor bestimmt (Bild 6).

Die gesamte Messeinrichtung besteht aus dem Messkopf des Laserinterferometers, dem Interferometerprisma, dem Reflektor, einem Rechner mit eingesetzter Messwerterfassungskarte für das Interferometer und einer unabhängigen Stromversorgungseinheit (Bild 6).

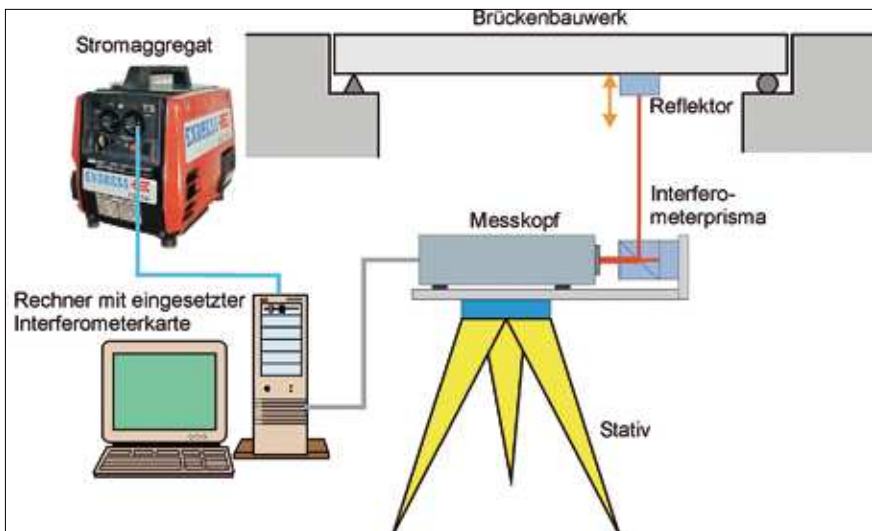


Bild 6: Messaufbau (schematisch)

Das erste Praxisbeispiel zeigt Schwingungsmessungen an einer Fußgängerbrücke mit einer Spannweite von 22 m als Stahl-Beton-Konstruktion /Engelhaupt 2005/. Da die Brücke über einen Bach verläuft, konnte das Interferometer nur 1,6 m vom Widerlager entfernt aufgestellt werden (*Bild 7*).



Bild 7:
Messaufbau an der Fußgängerbrücke

Unter der Beanspruchung durch Fußgänger beginnt die Brücke zu schwingen. Aus dem Weg-Zeit-Diagramm (*Bild 8*) einer extremen Anregung ist zu erkennen, dass am Messpunkt die Amplitude der Schwingung bis zu 7,5 mm ansteigt und dann wieder abklingt. Die Amplitude in der Mitte der Brücke ist weitaus größer (über 50 mm). In der Ausschnittvergrößerung (*Bild 9*) ist die hohe Präzision der interferometrischen Messungen zu erkennen; die einzelnen Messwerte zeichnen die Schwingung exakt nach. Das Fourier-Frequenz-Spektrum zeigt eine Frequenz von 2,6 Hz (*Bild 10*), die die Eigenfrequenz der Brücke, eine charakteristische Größe des Bauwerks, darstellt.

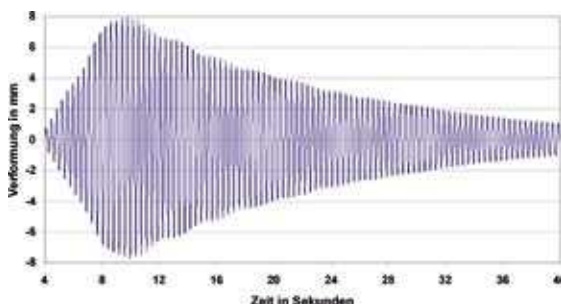


Bild 8:
Weg-Zeit-Diagramm
der Schwingung der
Fußgängerbrücke

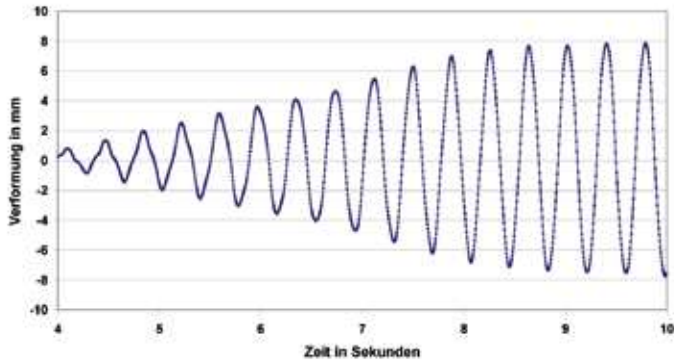


Bild 9: Ausschnittvergrößerung aus Bild 8

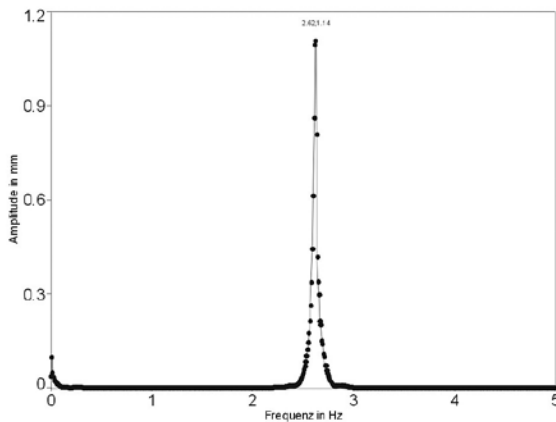


Bild 10: Fourier-Frequenz-Spektrum

Beim zweiten Beispiel handelt es sich um eine Eisenbahnbrücke mit einer Spannweite von 9,0 m /Engelhaupt 2005/. Bei der Überfahrt eines Zuges mit 3 Personenwagen und einer Lokomotive ergeben sich vertikale Verformungen bis zu 2,0 mm (Bild 11). Deutlich sind im Weg-Zeit-Diagramm die einzelnen Achsen der Wagen bzw. die der Lokomotive zu erkennen. Nach der Überfahrt kehrt die Brücke nicht direkt wieder in ihre Ausgangslage zurück; es verbleibt eine Abweichung von 0,4 mm, die wohl erst allmählich wieder abgebaut wird. Das Fourier-Frequenz-Spektrum wurde hier nicht bestimmt, da die Überfahrt eines Zuges mit Geschwindigkeiten von < 250 km/h die Brücke nicht zu Schwingungen anregt; es stellen sich vielmehr nur lastbedingte Verformungen ein.

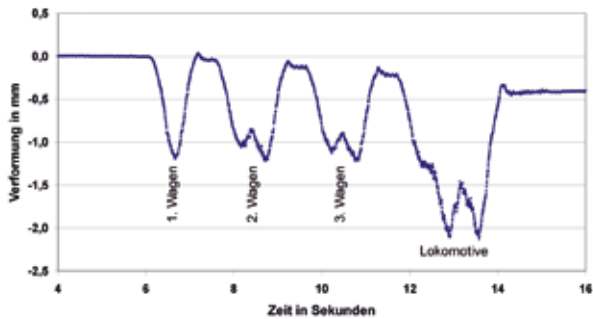


Bild 11: Weg-Zeit-Diagramm der Eisenbahnbrücke

Mit einem Laserinterferometer können auch die von einem Servotachymeter auf das Stativ übertragenen Schwingungen des Stativkopfes gemessen werden. Dazu wurde an einem Kragarm, der am Stativkopf befestigt war, am äußersten Ende ein Reflektor montiert. Die mit dem Laserinterferometer gemessenen Lageveränderungen des Reflektors umgerechnet als Winkelmaß zeigt *Bild 12* beispielhaft für den Zeiss S10 beim automatischen Einstellen der zweiten Fernrohrlage. Da die Auslösetaste für diese Verstellung exzentrisch zur Stehachse angeordnet ist, zeigen sich die Auswirkungen des Tastendrucks sehr deutlich. Nach einer Ruhepause von 0,5 s beginnt das Instrument mit der Verdrehung. Durch die Krafteinwirkung während der Verdrehung wird das Stativ zu Schwingungen angeregt; die maximalen Amplituden betragen bis zu 5 mgon. Aus *Bild 12* ist zu erkennen, dass nach Abschluss der Verdrehung eine bleibende Richtungsänderung von 0,5 mgon zu verzeichnen ist, die als systematische Messabweichung die Messgenauigkeit beeinträchtigt. Es besteht also insbesondere bei unzureichend gewarteten Stativen die Gefahr, dass bleibende Richtungsänderungen des Stativkopfes durch motorische Beschleunigungen des Tachymeters auftreten können.

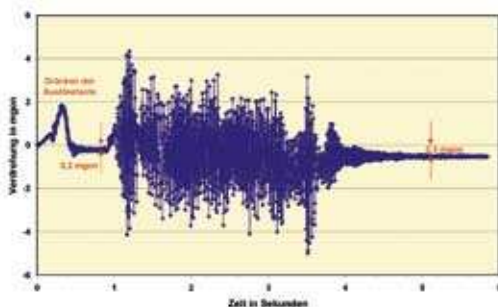


Bild 12:
Verdrehung des Stativkopfes durch motorische Beschleunigungen des Servotachymeters Zeiss S10

Bild 13 zeigt einen Ausschnitt der Bild 12. In dem dargestellten Messintervall von 1,2 s bis 1,5 s ist deutlich der Schwingungsverlauf zu erkennen, der eine Frequenz von ungefähr 50 Hz aufweist.

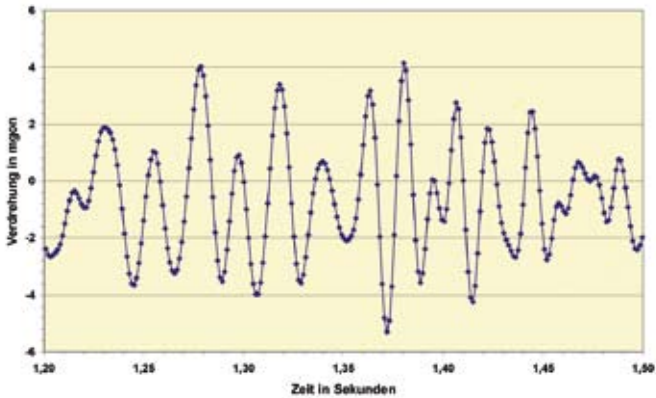


Bild 13: Detaildarstellung der Verdrehung des Stativkopfes

4 Faseroptische Sensoren

Faseroptische Sensoren auf Basis unterschiedlichster physikalischer Prinzipien werden benutzt, um Verformungen an Bauwerken oder um Temperaturen zu messen. Faseroptische Messungen liefern als Ergebnis Messwerte, die von der Längenänderung der Faser (Dehnung) und von der Temperatur der Faser bestimmt werden. Eine Trennung der beiden Einflussgrößen ist direkt nicht möglich. Deshalb ist für die Messung der einen Größe die Kenntnis der anderen immer erforderlich oder aber man verwendet eine zweite unbelastete Faser als Referenz.

So können Abstandsänderungen nach dem Verfahren der *Weißlichtinterferometrie* bestimmt werden /Koch, Ulrich (1991)/. Dazu werden im Bauwerk eine Mess- und eine Referenzfaser fest eingebaut. Während die Messfaser an zwei Stellen, deren gegenseitige Abstandsänderungen bestimmt werden sollen, mit dem Bauwerk fest verbunden ist, wird die Referenzfaser nur lose verlegt. Es wird davon ausgegangen, dass die Mess- und die Referenzfasern im Bauwerk die gleichen Temperaturen annehmen, die Abstandsänderungen aber sich nur auf die Messfaser auswirken. Beide Fasern werden an ihrem Ende mit einem Spiegel versehen, der das eingestrahelte Licht in den Fasern reflektiert. Die Abstandsänderungen werden derart bestimmt, dass ein breitbandiges Lichtsignal

in die Fasern eingespeist wird und im Auswertegerät ein beweglicher Spiegel verfahren wird (Bild 14), wie z. B. beim SOFO-Messsystem der Firma SMARTEC SA, CH-6928 Manno (Schweiz). Immer wenn die Streckenlängen zwischen der Mess- und Referenzfaser in Bezug zu einer internen konstanten Eichstrecke zur aktuellen Spiegelstellung im Auswertegerät gleich lang sind, ergeben sich nach dem Verfahren der Weißlichtinterferometrie Interferenzerscheinungen. Aus den jeweiligen Spiegelstellungen zuzuordnenden Interferenzerscheinungen kann direkt auf den Längenunterschied zwischen Referenz- und Messfaser geschlossen werden. Prinzipbedingt entstehen zwei Interferenzerscheinungen symmetrisch zum Nullpunkt im Abstand des gesuchten Längenunterschiedes (Bild 15). Der Nullpunkt wird dadurch gefunden, dass die Intensität der Interferenzerscheinung hier fast doppelt so groß ist wie bei den symmetrischen. Anders als bei interferometrischen Messungen kann das Auswertegerät von den im Bauwerk fest verlegten Fasern getrennt werden. Bei einem späteren Anschluss des Auswertegerätes kann dann der Längenunterschied zwischen den beiden Fasern erneut bestimmt werden. In einer Faser können auch mehrere teildurchlässige Spiegel installiert werden, so dass mit einer Faser die Längenänderungen von mehreren Abständen bestimmt werden können. Des Weiteren können im Prinzip beliebig viele Fasern mit dem Auswertegerät nacheinander ausgemessen werden. Die Messzeit einer Abstandsmessung ergibt sich aus der Verfahrzeit des beweglichen Spiegels im Messgerät; sie beträgt ca. 7 Sekunden. Die Abstände können mit einer Standardabweichung von wenigen Mikrometern gemessen werden.

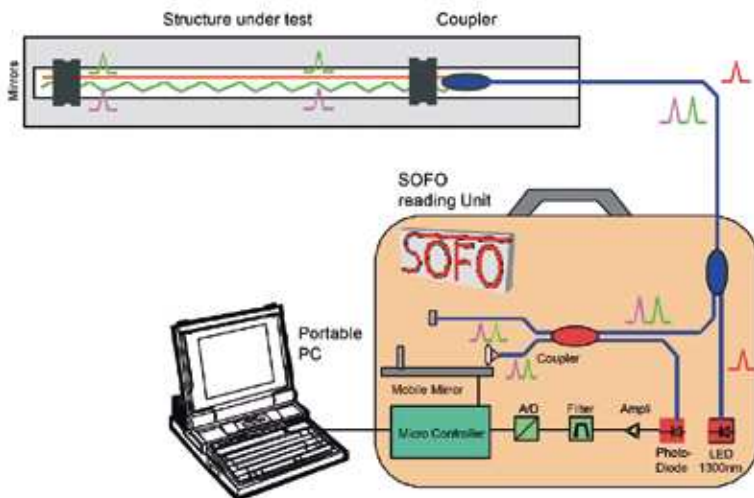


Bild 14: Messanordnung zur Bestimmung von Abstandsänderungen durch Weißlichtinterferometrie /Inaudi u. a. 1999/

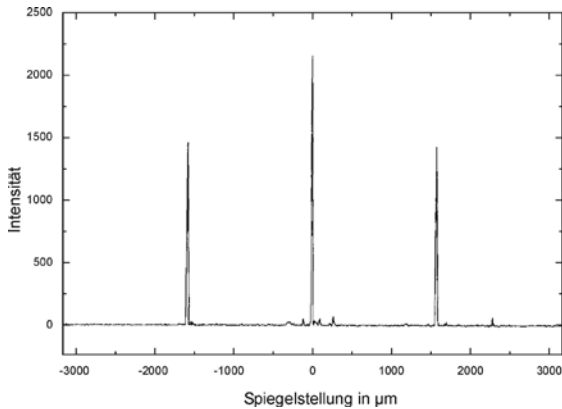


Bild 15:
Messung von Abstands-
änderungen durch
Weißlichtinterferometrie
/Inaudi u. a. 1994/

Zur Überwachung einer Hangbrücke bei Schladming (Österreich) wurden faseroptische Sensoren des SOFO-Systems in der 143 m langen und 45 cm dicken Betondecke eingebaut (*Bild 16*). Neben den Abstandsänderungen werden noch andere Parameter, wie z. B. die Temperatur in der Betondecke, gemessen.



Bild 16: Überwachung einer Hangbrücke mit faseroptischen Sensoren /Brunner, Lienhart/

Mit faseroptischen Sensoren können auch direkt Dehnungen mit sogenannten *Faser-Bragg-Gittern* bestimmt werden. Faser-Bragg-Gitter sind periodische Brechzahländerungen im lichtleitenden Kern von Einmodenfasern. Sie werden erzeugt durch seitliche Belichtung von Quarzglasfasern mit intensiver UV-Laserstrahlung unter Nutzung mikrolithographisch strukturierter Phasenmasken oder geeigneter Interferenzmuster /Willsch, Ecke (2005)/. Faser-Bragg-Gitter wirken als schmalbandige spektraloptische Filter, die Licht einer bestimmten

Wellenlänge in der Faser reflektieren (Bild 17). Die Eigenschaften von Faser-Bragg-Gittern, die in der Regel eine Länge zwischen einem und zehn Millimeter haben, werden von ihrer Gitter-Periode und den optischen Eigenschaften des Lichtwellenleiters bestimmt und sind demzufolge von der mechanischen Dehnung und von der Temperatur des Fasergitters abhängig. Der Messeffekt ist allerdings verhältnismäßig klein. Um eine relative Dehnung von $1 \cdot 10^{-6}$ ($= 1 \mu\text{m}/\text{m}$) bzw. eine Temperaturänderung von 0,1 K messen zu können, sind im üblichen Arbeitswellenlängenbereich von 800 nm bis 1500 nm Wellenlängenänderungen mit einer Auflösung von etwa 1 pm ($= 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}$) zu bestimmen (Willsch, Ecke (2005)). Die Wellenlängenänderungen werden mit einem Spektrographen über einen CCD-Zeilensensor gemessen. Relative Dehnungen können mit einer Standardabweichung zwischen $1 \cdot 10^{-6}$ und $5 \cdot 10^{-6}$ bestimmt werden. Da jedem Faser-Bragg-Gitter eine spezifische Wellenlänge zugeordnet wird, können in einer Faser bis zu ca. 20 Sensoren (Abstand der Wellenlänge: ca. 7 nm) gleichzeitig eingebracht werden (Wellenlängenmultiplexen.) Daneben können nach dem Verfahren des Zeitmultiplexens bis zu 500 Sensoren in ein Messsystem integriert werden. Da Faser-Bragg-Gitter-Sensoren sowohl auf Dehnung als auch auf Temperatur reagieren, muss immer eine dieser beiden Größen anderweitig bestimmt oder aber, der Messaufgabe entsprechend, wenigstens konstant gehalten werden.

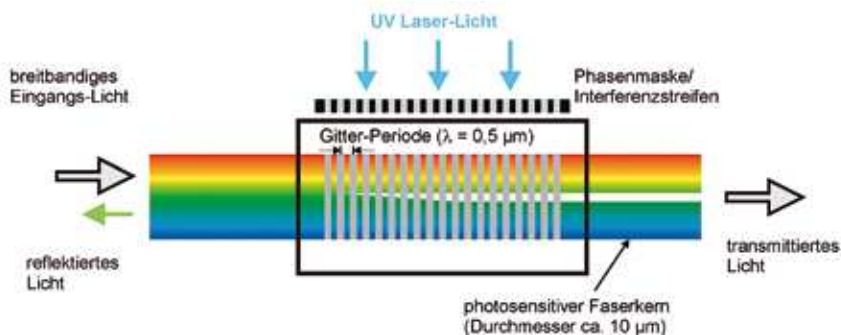


Bild 17: Prinzip der Faser-Bragg-Gitter nach (Willsch, Ecke (2005)/

Werden derartige mit Faser-Bragg-Gittern versehene Fasern in ein Bauwerk fest eingebracht, können die Dehnungen permanent beobachtet werden. Eine weitere Anwendung zielt darauf ab, den räumlichen Verlauf von Bohrlöchern aus Dehnungsmessungen mit Faser-Bragg-Gittern zu bestimmen. Der Grundgedanke besteht darin, auf der Oberfläche eines flexiblen Trägerkörpers mit kreisförmigem Querschnitt und einer Länge, die mindestens der des auszumessenden Bohrlochs entspricht, mindestens drei Lichtwellenleiter in Längsrichtung auf-

zubringen. Die Fasern werden unter einem Zentriwinkel von 120° montiert und sind in regelmäßigen Abständen, z. B. 1000 mm fest mit dem Trägerkörper verbunden bzw. auf ihrer gesamten Länge fest auf den Trägerkörper aufgeklebt. In der Mitte eines jeden Messelements einer jeden Faser werden Faser-Bragg-Gitter-Sensoren eingebracht. Aus den drei Dehnungsmessungen eines jeden Messelements kann die räumliche Krümmung des Trägerkörpers bestimmt und sein gesamter dreidimensionaler Verlauf über eine Integration über die Länge des Trägerkörpers berechnet werden. Messungen mit drei Fasern liefern zwar ein eindeutiges Ergebnis, aber zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und der Redundanz würde man zusätzlich weitere Fasern auf dem Trägerkörper montieren (Bild 18). In der Geotechnik werden Geräte, mit denen man aus den Richtungsänderungen benachbarter stabförmiger Elemente den räumlichen Verlauf bestimmen kann, als Deflektometer bezeichnet. Damit die zum Teil empfindlichen Lichtwellenleiter beim praktischen Betrieb nicht beschädigt werden, wird der Trägerkörper einschließlich der darauf montierten Fasern mit einer Schutzummantelung versehen. Das erste Messelement steckt in einem massiven geraden Hüllrohr, so dass über geodätische Messungen die Ausgangstrajektorie (Raumposition und -richtung) des Hüllrohres und damit die des Deflektometers in einem übergeordneten Koordinatensystem für einen eindeutigen Raumbezug ermittelt werden kann. Mit einem derartigen Bohrlochdeflektometer sollte es möglich sein, Bohrlöcher mit einer Tiefe von z. B. 50 m auf 20 mm bis 30 mm räumlich zu vermessen /Schwarz (2006a)/. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens soll das faseroptische Deflektometer untersucht, weiterentwickelt und für den praktischen Einsatz vorbereitet werden.

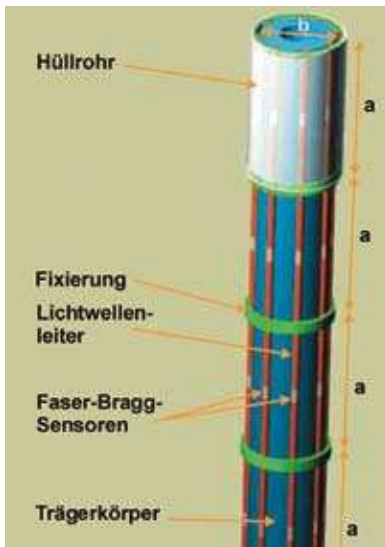


Bild 18:
Räumliche Darstellung des faseroptischen Deflektometers (Ausschnitt)

Der Einsatz von faseroptischen Sensoren hat einige Vorteile gegenüber klassischen Lösungen. Die Sensoren sind immun gegenüber elektromagnetischen Feldern; sie haben eine hohe Eigensicherheit, da keine elektrische Energie am Sensor erforderlich ist /Schallert u. a. 2004/. Dadurch können diese Sensoren problemlos in blitz- und explosionsgefährdeten Umgebungen eingesetzt werden. Die faseroptischen Sensoren sind widerstandsfähig gegenüber Erschütterungen und extremen Umweltbedingungen; sie haben geringe Abmessungen und ein geringes Gewicht. So können große Entfernungen (z. B. bis zu einem Kilometer) zwischen Messort und Auswertelektronik liegen. In einem Lichtwellenleiter können mehrere Sensoren angeordnet werden und es können durch Multiplexen viele Sensoren erfasst werden. Als Nachteil faseroptischer Sensoren wird angesehen, dass eine aufwändige opto-elektrische Signalwandlung erforderlich ist und dass in vielen Fällen eine Kompensation von Temperatureinflüssen notwendig wird. Faseroptische Sensoren können vorteilhaft in vielen Anwendungsfeldern des Bauingenieurwesens und der Geotechnik bei mobilen und stationären Einsätzen verwendet werden.

5 Industriephotogrammetrie

In der Industriephotogrammetrie werden heutzutage Kameras mit digitaler Bilderfassung eingesetzt. Die in den digitalen Bildern erfassten Informationen werden dann mit Verfahren der digitalen Bildverarbeitung untersucht, um z. B. die Bildkoordinaten von Messpunkten zu gewinnen. Moderne Operatoren liefern Subpixelgenauigkeit für die Koordinaten der Punkte.

Die Industriephotogrammetrie erfordert hinsichtlich der Hardware in erster Linie hochauflösende digitale Kameras /Seyler, Schwarz 2006/. Dabei lassen sich die Kameras in Videokameras, High-Speed-Kameras, intelligente Kameras sowie sogenannte Consumer und Professionelle Kameras unterscheiden, die für die Bildaufzeichnung CCD- oder CMOS-Sensoren einsetzen. Die geometrische Auflösung digitaler HighEnd-Kameras liegt heute bei über 10 Megapixel bei einer Pixelgröße zwischen 4 μm und 10 μm . Neben qualitativ hochwertigen Kameras sind ebenfalls Präzisionsmessobjektive für hochgenaue Messungen unerlässlich. Präzisionsobjektive zeichnen sich durch eine hohe Stabilität und Güte der Optik aus, was nicht zuletzt in der geringen Objektivverzeichnung zu erkennen ist. *Bild 19* zeigt beispielhaft die Verzeichnung des optischen Systems, bestehend aus der Videokamera SVS11000 und einem 60 mm-Objektiv. In den Randbereichen des CCD-Sensors betragen die durch die Verzeichnungseffekte bedingten Abweichungen bis zu 35 μm ; sie sind bei Präzisionsmessungen durch entsprechende Korrekturen zu berücksichtigen.

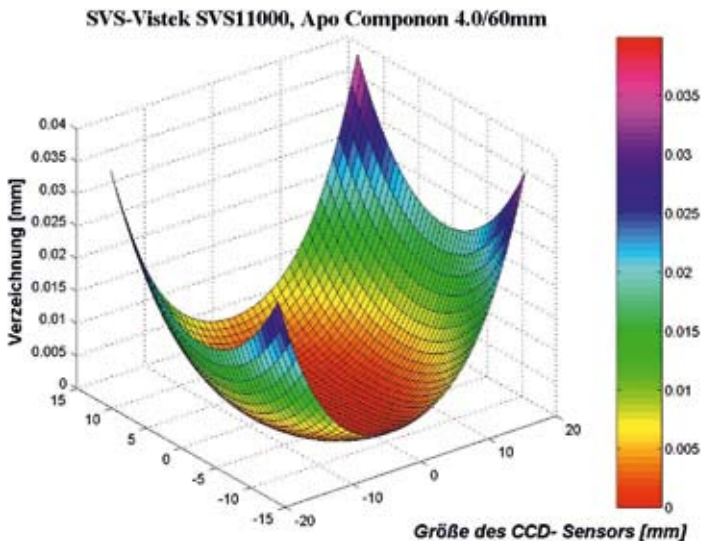


Bild 19: 3D-Darstellung der Verzeichnung der Videokamera SVS11000 (11 Megapixel)

Für den Datentransfer zum Rechner sind verschiedene Standards verfügbar, z. B. USB2.0, GigE-Vision, CameraLink oder Firewire. Die Wahl des Standards hängt von der spezifischen Aufgabenstellung ab, da keine der Techniken eine führende Rolle einnimmt.

Die moderne Photogrammetrie bietet viele neue Möglichkeiten für den Bereich der Ingenieurvermessung. Sie kann ein-, zwei-, drei- oder vierdimensionale Informationen liefern, falls erforderlich auch in Echtzeit. Als berührungsloses Messverfahren ist der Einsatz der Photogrammetrie auch dann noch möglich, wenn taktile Sensoren (z. B. Dehnungsmessstreifen, Wegsensoren) aufgrund ihres Platzbedarfs nicht mehr eingesetzt werden können. Hochauflösende Videokameras erlauben es, selbst dynamische Untersuchungen mit großer Präzision durchzuführen. Die Leistungsfähigkeit der Industriephotogrammetrie soll an zwei Beispielen demonstriert werden.

Beim ersten Beispiel sollte in einer Studie überprüft werden, inwieweit die Industriephotogrammetrie zur Bestimmung der Verformungen von Brückenbauwerken bei Tragsicherheitsbewertungen geeignet ist /Albert 2002/. Das Brückenbauwerk wird in Intervallen immer größeren Belastungen ausgesetzt.

Die damit verbundenen vertikalen Verformungen der Brücke sind in 6 bis 12 Punkten bei einer Messfrequenz von < 1 Hz mit einer Standardabweichung von $< 0,1$ mm zu bestimmen. Derzeit wird dafür ein Gerüst unter der Brücke aufgebaut, an dem im oberen Bereich an den entsprechenden Positionen elektrische Wegsensoren montiert werden. Das Gerüst bildet hierbei die Referenz (= Messbasis) für die Wegsensoren. Da der Aufbau des Gerüsts zeitaufwändig und kostspielig ist und seine Stabilität nicht immer ausreichend ist, könnte der Einsatz der Industriephotogrammetrie für diese Aufgabenstellung zweckmäßiger sein. Bei Brückenbauwerken mit einer Spannweite bis zu 18 m wird für das Aufbringen unterschiedlicher Lasten das eigens dafür entwickelte Belastungsfahrzeug BELFA (*Bild 20*) eingesetzt /Steffens u. a. 1999/, /Steffens u. a. 2001/, /Vockrodt, Schwesinger 2002/. Bei Brücken mit größeren Spannweiten werden die Belastungen durch mit Kies beladene Schwerlastfahrzeuge herbeigeführt.

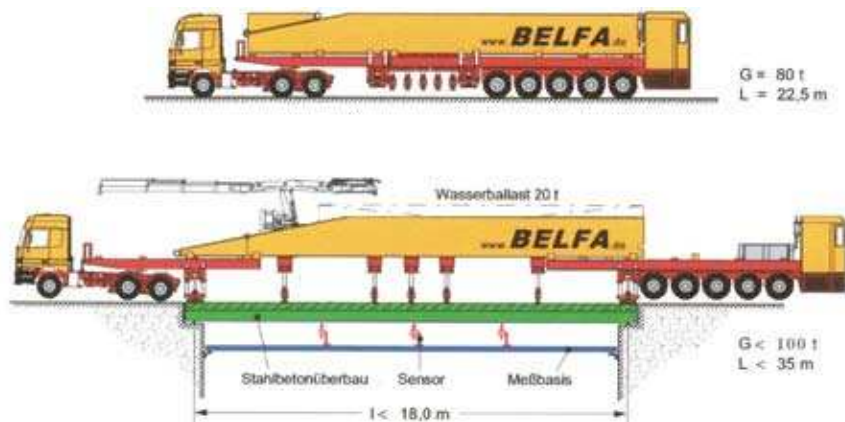


Bild 20: Belastungsfahrzeug BELFA (Prinzipzeichnung) /Steffens u. a. 2001/

Die Studie beschränkt sich auf die Bestimmung zweidimensionaler Verformungen mittels Einbildphotogrammetrie. Parallel zu den Messungen mit Wegsensoren werden mit einer Machine Vision Kamera mit einer Sensorgröße von 1300×1030 Pixel und einer Pixelgröße von $6,7 \mu\text{m}$ aus einer Aufnahmeentfernung von 32 m die an der Brücke (Spannweite = 29 m) montierten Messpunkte in einem Intervall von einer Sekunde aufgenommen (*Bild 21*). Neben den an der Brücke befestigten Messpunkten werden zusätzlich mehrere Referenzpunkte in Bereichen aufgestellt, die von den Krafteinwirkungen nicht beeinflusst wurden.



Bild 21: Aufnahmesituation an der Brücke

Der Auswertung erfolgt nicht online, sondern wird erst nach Abschluss der Lastversuche vorgenommen. In Bild 22 sind die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung den Messungen des entsprechenden Wegsensors gegenübergestellt. Die photogrammetrisch bestimmten Höhenänderungen sind im Vergleich zu den Wegsensormessungen unruhiger. Dies kann sicherlich zu einem guten Teil auf Einflüsse der Refraktion zurückgeführt werden. Werden die photogrammetrischen Messungen gefiltert (Mittelung über 10 zurückliegende Messungen), so ist eine vergleichsweise gute Übereinstimmung zwischen beiden Verfahren zu erkennen. Die Differenzen betragen in wenigen Fällen bis zu 0,2 mm. Die Standardabweichung der photogrammetrisch bestimmten Höhenänderungen kann mit 0,1 mm bis 0,2 mm angegeben werden. Dies entspricht einer relativen Genauigkeit in der Größenordnung von 1 : 200 000. Eine derart hohe Genauigkeit ist nicht zuletzt auf den relativen Charakter der Messungen bei unveränderter Kameraposition zurückzuführen, bei dem systematische Einflüsse nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Abhängig von der Größe des Objekts erreicht die Photogrammetrie damit zwar nicht das Genauigkeitspotenzial von Wegsensoren, jedoch ist sie für die meisten Anwendungen ausreichend. Insbesondere hat die Photogrammetrie als messbasisunabhängiges Verfahren einen eindeutigen Vorteil. Für den Aufbau der Messbasis, die für die Wegsensoren erforderlich ist, wurden bei dieser Brücke insgesamt zwei Tage benötigt. Die Genauigkeit beim photogrammetrischen Verfahren lässt sich durch eine Verringerung der Aufnahmeentfernung steigern.

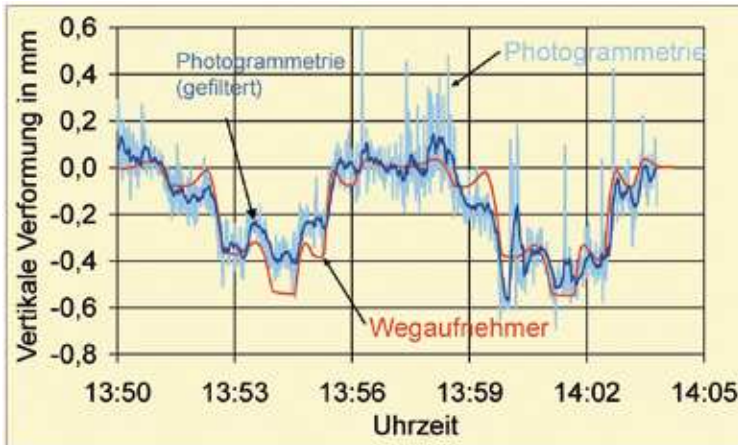


Bild 22: Vertikale Höhenänderungen des Punktes B9

Das Ziel weiterer Untersuchungen ist es, die auftretenden dreidimensionalen Verformungen in Echtzeit photogrammetrisch zu bestimmen. Durch den Einsatz von mehreren untereinander synchronisierten Kameras könnte die Brücke vollständig dreidimensional überwacht werden, und es könnten Informationen über die Zuverlässigkeit und Richtigkeit der bestimmten Verformungen abgeleitet werden. Die Verfahren der Bildmessung zur Bestimmung der Bildkoordinaten in den zu einem Zeitpunkt aufgenommenen Bildern, das Verfahren der Ausgleichung aller zeitgleichen Beobachtungen zur Berechnung der dreidimensionalen Koordinaten der Messpunkte und die Präsentation der Verschiebungsvektoren sind im Hinblick auf das geforderte Messintervall von einer Sekunde zu optimieren.

Im Mittelpunkt des zweiten Beispiels steht die dreidimensionale Verformungsbestimmung in der Beanspruchungsanalyse von Holzbauteilen im Vordergrund. Der Werkstoff Holz ist im Vergleich zu Stahl in seinen Strukturen als inhomogen zu bezeichnen. Erst durch Experimente, in denen das Dehnungsverhalten bestimmt wird, kann versucht werden, für den Werkstoff Holz sein Verhalten durch Modelle nachzubilden. Im Rahmen eines AiF-Projektes »Beanspruchungsanalyse von Bauteilen aus Voll- und Brettschichtholz durch Industriephotogrammetrie am Beispiel von Ausklinkungen und Durchbrüchen«, das gemeinsam von der Professur für Holz- und Mauerwerksbau und der Professur Geodäsie und Photogrammetrie der Bauhaus-Universität Weimar bearbeitet wird, werden in einem Messfeld ca. 50 cm x 30 cm die Dehnungsverläufe bei Belastungsversuchen quasi flächenhaft bestimmt. Dazu werden mittels zweier feststehender Kameras (hochauflösende digitale Spiegelreflexkameras, 6 Megapixel) simultan

Bilder des Versuchsobjekts aufgenommen, auf dem in einem regelmäßigen Raster von 10 mm Bildpunkte (Durchmesser 2 mm) signalisiert wurden. Das Messfeld wird von einem feststehenden Referenzrahmen mit weiteren Messpunkten umschlossen. Die Aufnahme­frequenz beträgt, bedingt durch diesen Kameratypus, nur rund 0,2 Hz. Unter diesen Umständen können die Veränderungen der Objektpunkte mit einer Standardabweichung von ca. 4 µm und damit die Dehnungen bei einem Messpunkt­abstand von 10 mm auf 0,4 ‰ bestimmt werden.

In einem Anschlussprojekt wird die bisherige Messkonzeption durch den Einsatz von hochauflösenden Videokameras verbessert. Dadurch wird ohne weiteres eine Bildfrequenz von 1 Hz erreicht, d. h. die zeitliche Auflösung wird gesteigert. Darüber hinaus besitzen die nun eingesetzten Monochrom-Kameras eine vollständige nutzbare geometrische Auflösung von 11 Megapixel². Dies ist eine Steigerung der Auflösung um den Faktor 4 bis 5. *Bild 23* zeigt den Versuchsaufbau. In der Ebene der Holzprobe können die Punktveränderungen in den Belastungsversuchen mit einer Standardabweichung von 0,5 µm und damit die Dehnungen bei einem Punkt­abstand von 10 mm auf 0,05 ‰ ermittelt werden. Werden die Belastungen bis zum Versagensfall gesteigert, so bilden sich zuvor Risse in der Holzprobe. Durch die Bildfrequenz von 1 Hz ist es möglich, die Geschwindigkeit dieser Rissbildung zu bestimmen und das Risswachstum zu ver-

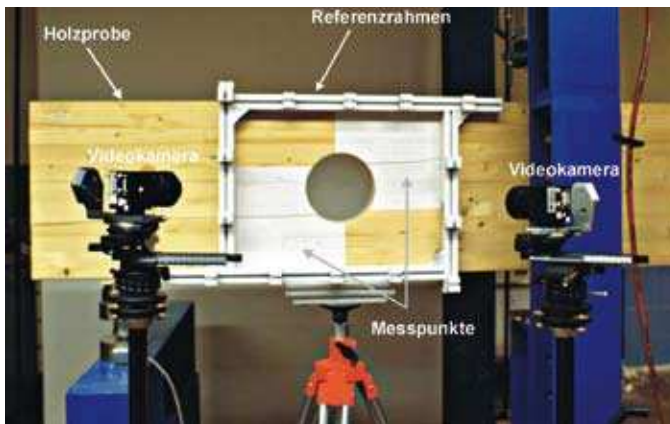


Bild 23: Versuchsaufbau mit Holzprobe und Referenzrahmen

² Die Spiegelreflexkameras haben einen Farbchip, der die Farbinformation durch Interpolationsverfahren berechnet. Dies hat zur Folge, dass die nominelle Auflösung von 6 Megapixel nicht vollständig zur Verfügung steht, im Gegensatz zur Bildinformation einer Monochrom-Kamera.

folgen. Die Bildaufnahme kann mit der Photogrammetrie bis zum Versagensfall erfolgen, ohne eine Beschädigung der Messapparatur befürchten zu müssen. Beim Einsatz von taktilen Messverfahren (Wegsensoren, Dehnungsmessstreifen) besteht die Gefahr der Beschädigung der Sensoren im Versagensfall der Holzprobe, so dass man deshalb zumeist die Belastung nicht bis in diesen Bereich steigert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag konnte nur ein Überblick über einige Facetten der Ingenieurgeodäsie und die dafür entwickelten Lösungskonzepte gegeben werden. Die Forderung nach höheren Genauigkeiten ist besonders im Bereich des Maschinenbaus nach wie vor ungebrochen. Weiterhin werden zunehmend Messsysteme gefordert, die echtzeitfähig sind. Durch die Steigerung der Leistungspotenziale bei den in den letzten Jahren entwickelten Instrumenten eröffnen sich neue Möglichkeiten; sie vergrößern das Spektrum ingenieurgeodätischer Anwendungen. Es wurde versucht aufzuzeigen, welche Dynamik in der Weiterentwicklung der Ingenieurgeodäsie steckt. Nur wenn man bereit ist, sich diesen Herausforderungen in der Lehre bei der Ausbildung der Studierenden und bei der Weiterbildung bereits in der Praxis stehender Vermessungsingenieure zu stellen, kann es gelingen, Arbeitsfelder für Morgen zu besetzen und zu erschließen. Dabei spielt auch die interdisziplinäre Zusammenarbeit aller an den Projekten beteiligten Fachdisziplinen eine wichtige Rolle.

Literatur

- Albert, J. (2002):* Photogrammetrische Verformungsmessungen an Brücken. In: Schriftenreihe des Deutschen Verein für Vermessungswesen (DVM); Band 43, Seite 57-68, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart 2002.
- Brunner, F.; Lienhart, W.:* Projekt Brückenüberwachung mit eingebetteten faseroptischen Sensoren. <http://www.cis.TUGraz.at/ivm>
- Engelhaupt, M. (2005):* Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Brückenbauwerken unterschiedlicher Bauart mittels Laserinterferometer, Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) in Zusammenarbeit mit der Bauhaus-Universität Weimar, Dresden 2005.
- Inaudi, D. u. a. (1994):* Low-coherence deformation sensors für the monitoring of civil-engineering structures. In: Sensors and Actuators A 44(1994), page 125-130.

- Inaudi, D. (1999):* Deformationsmessungen mit Glasfasersensoren – Anwendungen von Lichtwellenleitersensoren zur Überwachung von Bauwerken. In: TFB Veranstaltung 4371/72, 03.06.12.1999, Wildegg, Switzerland.
- Koch, A.; Ulrich, R. (1991):* Fiber-optic Displacement Sensor with 0.02 μm Resolution by White-light Interferometry. In: Sensors and Actuators A 25-27(1991), page 201-207.
- Schallert, M. u. a. (2004):* Auswahl geeigneter Fasersensorprinzipien für Anwendungen in der Geotechnik. In: Stahlmann, J. (Hrsg.): Messen in der Geotechnik 2004, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft Nr. 77, Seite 309-328, Braunschweig 2004.
- Schwarz, W. (2005):* Komparatoren zur Überprüfung von Präzisionsnivellierlatten. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN 112(2005)6, Seite 204-212.
- Schwarz, W. (2006a):* Konzeption eines faseroptischen Bohrlochdeflektometers. In: Stahlmann, J. (Hrsg.): Messen in der Geotechnik 2006, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 82, Seite 287-300, Braunschweig 2006.
- Schwarz, W. (2006b):* Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Brückenbauwerken mittels Laserinterferometer. In: VDI-Berichte 1941, Seite 155-168, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 2006.
- Seyler, S.; Schwarz, W. (2006):* Moderne Industriephogrammetrie im Bauwesen – Monitoring und Bewertung von Bauwerken. In : Gürlebeck, K.; Könke, C. (Ed.): 17. Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen, Weimar 12.-14. Juli 2006.
- Steffens, K. u. a. (1999):* Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Brücken. In: Bautechnik 76(1999)1, Seite 1-15.
- Steffens, K. u. a. (2001):* Das Belastungsfahrzeug BELFA für die Tragsicherheitsbewertung von Massivbrücken und Abwasserkanälen. In: Bautechnik 78(2001)6, Seite 391-397.
- Vockrodt, H.-J.; Schwesinger, P. (2002):* Experimentelle Tragfähigkeitsanalyse einer historischen Bogenbrücke in Erfurt. In: Bautechnik 79(2002)6, Seite 355-367.
- Willsch, R.; Ecke, W. (2005):* Faser-Bragg-Gitter: Herstellung und Eigenschaften. <http://www.ipht-jena.de>, Jena 2005.