

Beanspruchungsanalyse von Bauteilen aus Voll- und Brettschichtholz durch Industriephotogrammetrie am Beispiel von Ausklinkungen und Durchbrüchen

Marcus Schwark, Bauhaus-Universität Weimar

Zusammenfassung: Digitale Photogrammetrie ist ein brauchbares Werkzeug, um dreidimensionale Dehnungen in Holzbauteilen nachzuweisen. Dieses Poster beschreibt den Aufbau und Einsatz eines Zweikamerasystems, mit dem Beanspruchungsanalysen von Bauteilen aus Voll- und Brettschichtholz durchgeführt werden können. Insbesondere wird auf die erreichbare Genauigkeit des Systems anhand praktischer Versuche eingegangen.

1 Einleitung

In einem AIF-Projekt (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“), das zusammen mit der Professur für Holz- und Mauerwerksbau bearbeitet wird, soll das Verhalten von Holzverbindungen und –ausklinkungen untersucht werden. In Belastungsversuchen sind die Verformungen und besonders die Dehnungen dieser Bauteile in einem Messfeld von 0,2 m x 0,4 m mit einer Standardabweichung von wenigen Mikrometern zu bestimmen. Die Verformungen werden mittels berührungsloser Messungen mit dem Verfahren der digitalen Photogrammetrie bestimmt. Im Vergleich zu den klassischen Methoden, zu denen u. a. induktive Wegaufnehmer oder Dehnungsmessstreifen gehören, zeichnet sich die digitale Photogrammetrie durch einfachere Handhabbarkeit und eine nahezu aufwandsneutrale Verdichtung diskreter Messstellen aus. Hierbei werden aus mehreren gleichzeitig ausgeführten Aufnahmen dreidimensionale Koordinaten von den Objektpunkten bestimmt, aus denen die gewünschten Informationen z. B. Dehnungen abgeleitet werden. Die photogrammetrisch bestimmten Dehnungen dienen dazu, aussagekräftige Modelle zu entwickeln, die das tatsächliche Verhalten der Holzbauteile und Holzverbindungen bestmöglich beschreiben können.

2 Bildaufnahme

Es werden mindestens zwei sich überlappende Bilder benötigt, um 3D-Koordinaten bestimmen zu können. Im Falle eines sich bewegenden Objektes, wie z. B. bei Belastungsversuchen, ist es notwendig, dass zwei synchronisierte Kameras simultan Bilder des Objektes aufnehmen. Die Aufnahmestrahlen beider Kameras schneiden sich in den Zielpunkten unter einem Winkel von $<90^\circ$, damit die Dehnungen möglichst genau erhalten werden. Zur Gewährleistung einer stabilen Verknüpfung bei der Bündelblockausgleichung wird um den Probekörper ein Referenzrahmen positioniert (Abb. 1). Auf diesem Referenzrahmen sind 60 Punkte in einer Ebene und 12 Hochpunkte aufgebracht (Abb. 2). Durch die Verwendung von Hochpunkten wird eine größere Genauigkeit der 3D-Punktkoordinaten erreicht. Mit diesem Referenzrahmen werden das Koordinatensystem sowie der Maßstab festgelegt. Die 3D-Koordinaten aller Punkte des Referenzrahmens werden durch eine Simultankalibrierung bestimmt [Kraus 1989].

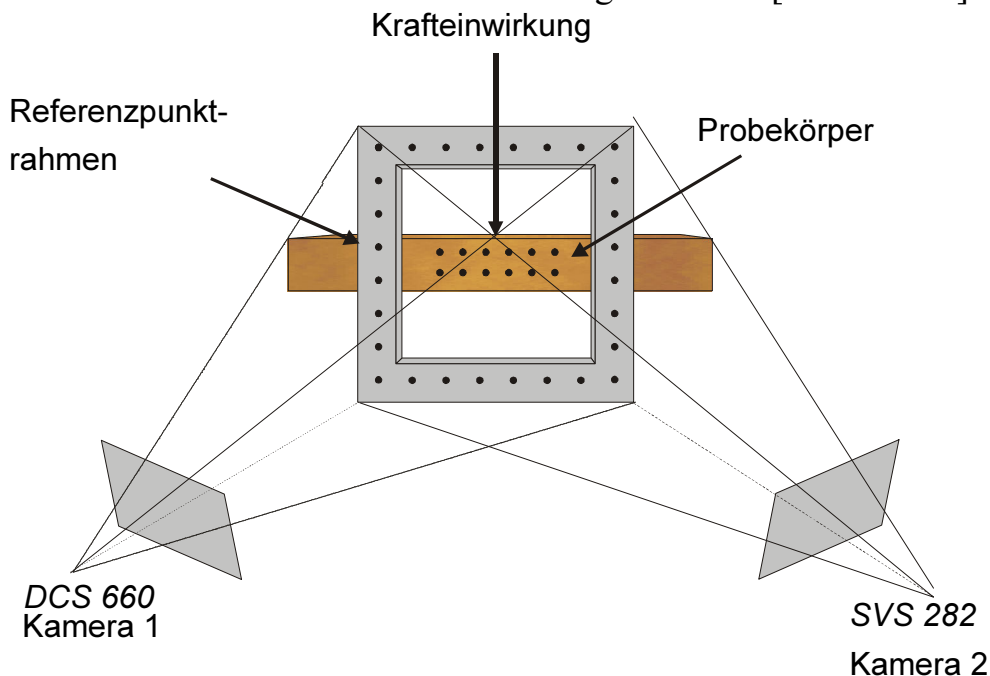


Abbildung 1: *Aufnahmegeometrie*

Folgende Kameras wurden verwendet:

1. *Still Video Kamera DCS 660 (Kodak)*: Diese digitale Kamera aus dem Bereich der professionellen Fotografie (Tab. 2) lässt sich über einen angeschlossenen Rechner fernsteuern. Allerdings gestattet dieser Betriebsmodus – aufgrund der hohen Übertragungszeit – die Aufnahme von Einzelbildern nur im Abstand von 6 Sekunden.

2. *SVS 282 Color Kamera (SVS-Vistek)*: Die Vision-Kamera (Tab. 1). lässt sich über einen angeschlossenen Rechner (Framegrabber) steuern. Es können dabei

bis zu zwei Bilder in der Sekunde aufgenommen werden. Diese Kamera besitzt keinen mechanischen Verschluss. Die Belichtungszeit wird elektronisch über den PC gesteuert.

Sensorgröße	8,8 mm x 6,66 mm
Auflösung	2580x1944 Pixel
Pixelgröße	3,4 μm x 3,4 μm
Filesize RGB	7,85 MB
Filesize S/W	4,95 MB
Interface	RS-644 (LVDS)
Maße B/T/H	50/50/155 (mm)
Gewicht	400 g

Tabelle 1: Technische Daten der SVS 282 Color

Basiskamera	Nikon F5
Sensor	M16
Sensorgröße	18,3 mm x 27,7 mm
Auflösung	2008 x 3040 Pixel
Pixelgröße	9 μm x 9 μm
Filesize RGB	17,4 MB
Filesize S/W	5,8 MB
Interface	IEEE 1394 / PC Card
Maße B/T/H	194/88/158 (mm)
Gewicht	1,58 kg

Tabelle 2: Technische Daten der DCS 660

Bei der SVS 282 handelt es sich um eine Farbkamera. Bei einer Farbkamera wird vor dem CCD-Flächensensor eine Filtermaske angebracht, die die einzelnen Sensorelemente jeweils für nur eine Farbe (Rot, Grün oder Blau) empfindlich macht. Der Farbwert jedes einzelnen Pixels wird durch Interpolation benachbarter Farbpixel gewonnen. Dabei sinkt die geometrische Auflösung mindestens um den Faktor 2 [Luhmann 2000]. Die Farbinterpolation der einzelnen Pixel lässt sich bei der SVS 282 ausschalten. Daher kann der Versuch unter Infrarotbeleuchtung sowie mit einem Infrarotdurchlassfilter aufgebaut werden. Als Ergebnis erhält man Graustufen-Bilder, die sehr homogen sind, da die einzelnen Farbelemente (Rot, Grün und Blau) im Infrarotbereich annähernd die gleiche Empfindlichkeit aufweisen. Die Verwendung der Graustufen-Bilder erhöht die Anzahl der effektiven Pixel des Bildes, was die Genauigkeit der Punktkoordinaten erhöht.

3 Kamerakalibrierung

Eine Kalibrierung beider Kameras ist notwendig, um eine bestmögliche Genauigkeit bei der Bestimmung der 3D-Objektkoordinaten zu erreichen. Hierbei werden die Parameter der inneren Orientierung (Kamerakonstante, Lage des Hauptpunktes, sowie die Parameter der Verzerrung) beider Kameras sowie die 3D-Punktkoordinaten des Referenzrahmens ermittelt. Zur Kalibrierung wird ein selbst angefertigtes Kalibrierfeld verwendet, dessen Punktkoordinaten mit einer Koordinatenmessmaschine ausgemessen wurden. Die Kalibrierung der Kameras und des Rahmens erfolgt täglich vor jedem praktischen Einsatz neu. Dadurch ist es möglich, Veränderungen des Referenzpunktrahmens und der Kameraparameter nachzuweisen.

Zur Kalibrierung werden mit beiden Kameras je acht Aufnahmen vom Referenzrahmen und vom Kalibrierfeld gemacht. Vier Schrägaufnahmen gewährleisten eine gute Schnittgeometrie. Weitere vier Aufnahmen in Frontalperspektive werden nacheinander mit einer jeweils um 90° gekanteten Kamera realisiert. Durch das Kanten der Kamera werden die Korrelationen zwischen den verschiedenen unbekanntem Parametern der Kamera reduziert [Maas 1998]. Das Kalibrierfeld dient zur Festlegung des Koordinatensystems und des Maßstabes und gewährleistet durch die große Anzahl von Passpunkten, die über das gesamte Bild verteilt sind, eine genaue Bestimmung der Verzeichnungsparameter.

Die Auswertung der Bildpaare der Zug- und Biegeversuche mit Voll- und Brett-schichtholzträgern erfolgt dann mit festen Verzeichnungsparametern beider Kameras sowie festen Passpunktkoordinaten.

4 Erreichbare Genauigkeiten

Mit Hilfe des Versuchsaufbaues in Abbildung 2 wird die erreichbare Genauigkeit der Streckenmessung bestimmt.

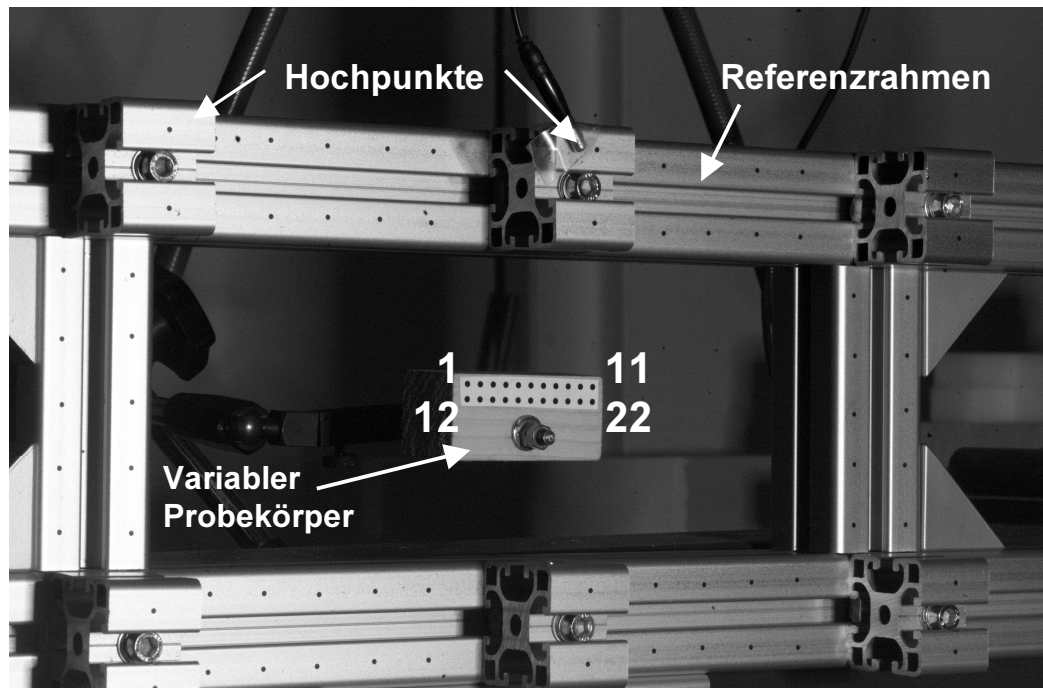


Abbildung 2: Distanzversuch

Dazu wird ein Holzstück mit 22 Objektpunkten im Referenzrahmen positioniert und mit beiden Kameras jeweils ein Bild aufgenommen. Insgesamt entstehen dabei 20 Bildpaare.

Bei jeweils vier Bildpaaren bleibt die Lage des Holzstücks unverändert. Im Anschluss wird der Probekörper im Rahmen neu positioniert. Dabei wird das Holzstück verschoben und gedreht. Die Geometrie des Probekörpers ist während der Versuchszeit als stabil anzunehmen. Daher müssen gleiche Strecken zwi-

schen den Punkten aller Bildpaare übereinstimmen. Aus den Abweichungen lässt sich auf die Reproduzierbarkeit von Dehnungsbestimmungen schließen.

	Strecke 1 - 2	Strecke 1 – 12	Strecke 1 - 22
Mittelwert	5019 μm	4974 μm	50040 μm
Bildpaar 1	2 μm	0 μm	4 μm
Bildpaar 2	2 μm	1 μm	2 μm
Bildpaar 3	-2 μm	-3 μm	2 μm
Bildpaar 4	0 μm	1 μm	0 μm
Bildpaar 5	-2 μm	0 μm	-1 μm
Bildpaar 6	0 μm	-1 μm	1 μm
Bildpaar 7	-1 μm	1 μm	-1 μm
Bildpaar 8	0 μm	1 μm	-2 μm
Bildpaar 9	1 μm	-1 μm	-3 μm
Bildpaar 10	2 μm	-2 μm	-2 μm

Tabelle 3: Abweichungen der Strecken vom Mittelwert

Die Tabelle 3 zeigt beispielhaft für 3 Strecken die Abweichungen der berechneten Strecken vom Mittelwert für die ersten 10 (von 20) Bildpaare. Dabei entspricht die erste Strecke einer Horizontal-, die zweite einer Vertikalstrecke und die dritte der längsten Strecke.

Horizontale Strecken	Vertikale Strecken	Längste Strecke
Standardabweichung	Standardabweichung	Standardabweichung
1,5 μm	1,5 μm	1,8 μm

Tabelle 4: Standardabweichung der Strecken

In Tabelle 4 sind die Standardabweichungen für alle Horizontal-, Vertikal- und längsten Strecken zu entnehmen. Bei der Berechnung der Standardabweichung in Spalte eins gehen alle horizontalen Strecken benachbarter Punkte (1-2, 3-4, 5-6 etc.) ein. Die vertikale Standardabweichung beinhaltet alle vertikalen Strecken (1-12, 2-13 etc.). Die Standardabweichung der längsten Strecke wurde nur aus den Abweichungen der bestimmten Strecke jedes Bildpaares vom Mittelwert berechnet. Aus den experimentellen Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass Streckenänderungen mit einer Standardabweichung von wenigen Mikrometern gemessen werden können. Diese hohe Genauigkeit lässt sich erreichen, da bei Streckenänderungen systematische Fehlereinflüsse durch Differenzbildung herausfallen. Bei praktischen Versuchen mit bewegten Objekten wird erwartungsgemäß eine weniger hohe Genauigkeit erreicht, da beide Kameras zwar synchronisiert sind, aber nicht simultan das Bild aufnehmen. Die Zeitdiffe-

renz zwischen den Aufnahmen beträgt 200 Millisekunden. Diese Zeitdifferenz ist aufgrund der im Interlaced-Modus arbeitenden SVS 282 erforderlich. Dieser Modus ist dadurch charakterisiert, dass er ein Bild aus zwei Aufnahmen zusammensetzt, die fortlaufend gemacht werden. Aus dem ersten Halbbild werden die ungeraden (1, 3, 5, 7...) Zeilen für das Ergebnisbild verwendet und aus dem zweiten die geraden Zeilen (2, 4, 6, 8...). Bei simultaner Aufnahme würde demgemäß ein Halbbild der SVS 282 verblitzt und das andere Halbbild normal belichtet. Diese Bilder können dann nicht mehr ausgewertet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Wie in den beiden Beispielen gezeigt wurde, lässt sich mit dem hier vorgestellten System eine Standardabweichung von wenigen Mikrometern in der Bestimmung von Dehnungen bei einer Bildbreite von einem halben Meter erreichen. Somit stellt die Photogrammetrie für Dehnungen im Vergleich zu den klassischen Messverfahren eine gute Alternative dar. Es ist möglich, eine große Anzahl von Objektpunkten zu messen. Eine Steigerung der Bildfolge ließe sich durch das Ersetzen der DCS 660 erreichen. Bei einem Einsatz von einer zweiten SVS 282 wäre es möglich, die Aufnahmefrequenz auf 2 Hz bis 3 Hz zu erhöhen. Damit wäre es möglich, auch schnelle Prozesse wie Rissentwicklungen zu untersuchen.

Literatur:

- Kraus, K. 1997: Photogrammetrie, Band 1: Grundlagen und Standardverfahren, 6. Auflage. Ferd. Dümmler's Verlag, Bonn 1997.
- Luhmann, T. 2000: Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg 2000.
- Maas, H.G. 1998: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler Innerer Orientierung. DGPF-Jahrestagung, München, 14.- 16.10.1998.

Anschrift:

Bauhaus-Universität Weimar
Marcus Schwark
Professur für Geodäsie und Photogrammetrie
Marienstraße 9
99425 Weimar
marcus.schwark@bauing.uni-weimar.de