Mit 3D-Scanning zur Erfassung des Knitterversagens von Sandwichpaneelen*

Klaus Berner, iS-mainz, Fachhochschule Mainz, Lars Pfeiffer, iS-mainz, Fachhochschule Mainz, Martin Schlüter, i3mainz, Fachhochschule Mainz, Christian Weides, Fachhochschule Mainz

Zusammenfassung: Mit einem mobilen 3D-Scansystem werden Deformationsmessungen an Sandwichelementen durchgeführt. Durch die schnelle und flächenhafte Erfassung geometrischer Oberflächenveränderungen werden qualitative und quantitative Aussagen zum Beulverhalten der Sandwichdeckschicht unter wachsender Belastung gewonnen. Ziel ist die Absicherung der theoretischen Modellbildung des Bauteilverhaltens mit Blick auf zukünftige Berechnungsmodelle. Diskutiert werden insbesondere der Hintergrund der Messaufgabe sowie Strategie und praktische Umsetzung der Messdatenprozessierung.

1 3D-Scanning am i3mainz

Forschung und Entwicklung im Bereich 3D-Scanning und 3D-Visualisierung zählen seit der Gründung des Instituts für Raumbezogene Informations- und Messtechnik *i3mainz* im Jahr 1998 zu den inhaltlichen Schwerpunkten. Unter anderem wurde ein Testparcours für Laserscanner mittlerer Reichweiten aufgebaut. Nicht zuletzt auch durch die erfolgreiche Arbeit des vom Land Rheinland-Pfalz am i3mainz eingerichteten Kompetenzzentrums *Raumbezogene Informationstechnik in den Geisteswissenschaften* (unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Böhler) steht Ende 2003 eine exzellent sortierte Palette modernster mobiler 3D-Scansysteme zur Verfügung, [Böhler und Marbs 2002]. Mit je einem Leica Cyrax 2500, Mensi SOISIC, 3dscanners Modelmaker X70 auf Faro-Messarm sowie einem GOM ATOS II werden in Mainz anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsaufgaben für Objektabmessungen ab etwa zehn Zentimetern bis hin zu mehreren hundert Metern gelöst, [Marbs 2003].

^{*} Dieser Beitrag wurde durch die Zuweisung von Forschungsmitteln aus dem Forschungsfonds des Senats der Fachhochschule Mainz gefördert.

2 Sandwichelemente im Hochbau

Sandwichelemente erfreuen sich in den letzten Jahren wachsender Beliebtheit im Bausektor. Insbesondere als raumbildende Dach- und Wandkonstruktionen mit lastabtragender Wirkung bilden sie eine Alternative zu den konventionellen Wandverkleidungen. Der Vorteil der Sandwichtragwerke liegt in der schnellen Montage von industriell vorgefertigten Bauteilen. So werden Bauzeiten minimiert und Fehler bei der Errichtung vermieden.

2.1 Tragverhalten und Aufbau von Sandwichelementen

Sandwichelemente sind tragende Bauteile. Sie geben Lasten wie Wind und Schnee an die Unterkonstruktion weiter. Aufgrund der besonderen Tragstruktur von Sandwichelementen bestehend aus einem schubsteifen Kern und zwei metallischen Deckschichten, ergeben sich unterschiedliche Versagenszustände im Vergleich zu herkömmlichen Tragwerken. So, als Versagensursache momentenbeanspruchter Elemente, ein kurzwelliges Beulversagen der auf Druck beanspruchten Deckschicht, das Knittern. Während die Querkraft durch den schubsteifen Kern aufgenommen wird, entsteht durch das Biegemoment ein Kräftepaar mit entgegengesetztem Vorzeichen in den beiden Deckschichten. Da es sich im Allgemeinen um dünne Deckschichten, also ohne nennenswerte eigene Biegesteifigkeit handelt, müssen die Deckschichten bei Druckbeanspruchung durch die stützende Kernschicht stabilisiert werden. Die mechanischen Eigenschaften des Kerns haben daher einen signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten der Gesamtstruktur.

2.2 Ermittlung ideeller Knitterlasten

Zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit von Sandwichelementen bis zum Knitterversagen liegen zwar Theorien vor [Linke 1978], [Plantema 1966], jedoch liefern diese, im Vergleich mit den experimentell gefundenen Ergebnissen, nur unbefriedigende Werte.

Grundsätzlich beruhen diese Theorien auf der ideellen Knitterlast, also der Knitterlast bis zum Beulversagen als Eigenwertproblem nach folgender Formel:

E_{f} Elastizitätsmodul der Deckschicht E_{c} Mittelwert aus Druck- und Zugmodul der Kernsch G_{c} Schubmodul der Kernschicht

2.3 Bettungsspannungen der Kernschicht

Bevor das Bauteil durch Knittern versagt, stellt sich eine wellenförmige Verformung der auf Druck beanspruchten Deckschicht ein. Diese Verformung aktiviert die stützende Wirkung des Kerns. In [Linke 1978] und [Plantema 1966] wird davon ausgegangen, dass diese erste Verformung einen sinusförmigen Verlauf einnimmt, vgl. Abb. 1.



in der Grenzschicht zwischen Kern- und Deckschicht

In der Kernschicht entstehen Zug- und Druckkräfte. Reicht die Haftung zwischen Deck- und Kernschicht oder die Zug- bzw. Druckfestigkeit der Kernschicht nicht mehr aus um die Deckschicht zu stabilisieren, stellt sich ein Versagen (Knittern) vor dem Erreichen der ideellen Knitterspannung ein.

Die auftretende Bettungsspannung lässt sich nach [Linke 1978] mathematisch bestimmen. Der maximale Absolutwert der Kernschichtbeanspruchung ergibt sich zu:

$$\max \sigma_{c} = \frac{\pi}{a} \cdot \sqrt{E_{c} \cdot G_{c}} \cdot f_{0} \cdot t \cdot \frac{\sigma_{x}(i)}{\sigma_{wi} - \sigma_{x}(i)} ; \quad \begin{array}{c} \sigma_{c} & \text{vorliegende Bettungsspannung} \\ \text{a} & \text{Länge der Sinushalbwelle} \\ f_{0} & \text{Amplitude der Sinushalbwelle} \\ \text{t} & \text{Dicke der druckbeanspruchten Deck-schicht} \\ \sigma_{x}(i) & \text{in der Deckschicht vorhandene Druck-spannung} \\ \sigma_{wi} & \text{ideelle Knitterspannung} \end{array}$$

Die Bettungsspannung in der Kernschicht ist somit neben den mechanischen Kenngrößen des Kerns und der Höhe der Druckspannung in der Deckschicht vor allem abhängig von Amplitude und Wellenlänge der angenommenen Sinushalbwelle. Können Materialeigenschaften des Kerns und die vorhandene Spannung in der Deckschicht sehr genau bestimmt werden, so waren für die Eigenschaften der sinusförmigen Verformung bislang nur Annahmen möglich. In [Linke 1978] wird gezeigt, dass die Länge der Halbwelle bestimmt ist durch:

$$a = \pi \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot D}{\sqrt{E_c \cdot G_c}}}$$
; D Steifigkeit der Deckschicht

Für die Amplitude der Halbwelle wird in [Linke 1978] mit Verweis auf [Plantema 1966] angenommen:

$$f_0 = \frac{a}{500}$$

Zur Ermittlung der Kernspannungen ist der Einfluss der Amplitude also linear. Der Divisor 500 ist hier aber nur geschätzt und experimentell nicht bestätigt. Genaue Untersuchungen zur tatsächlichen Verformung der Deckschicht liegen aber derzeit nicht vor. Die Verformungen sind während der Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Tragfähigkeit bei Versagen durch Knittern mit bloßem Auge nicht oder nur sehr schwach sichtbar.

3 Experimentelle Durchführung

Um die Bettungsspannungen, die auf einen Sandwichkern wirken, genau zu bestimmen, ist es nötig, die Verformung in Deckschichtebene während eines Biegeversuchs zu beobachten, vgl. Abb. 2. Wellenlänge und Amplitude sowie die Wellenform sollen möglichst exakt bestimmt werden.

Gegenstand der Untersuchung sind Sandwichpaneele mit Polystyrol Kern und Deckschichten aus Stahlblech. Die genauen Werkstoffeigenschaften der Kernund Deckschicht wurden experimentell bestimmt. Für die untersuchte Paneelkonfiguration ergab sich eine theoretisch zu erwartende Wellenlänge von a=78,8mm und eine Amplitude von $f_0=0,16mm$.

Als Versuchsaufbau wurde ein Sechs-Punkt Biegeversuch mit Lasteinleitung in den Bauteilviertelspunkten nach [prEN 14 509] sowie ein neu entwickelter Kleinversuch gewählt. Untersucht wurde jeweils der Bereich mit den größten Druckbeanspruchungen in der Deckschicht, vgl. Abb. 2.



Abb. 2: Aufbau des Kleinversuchs mit Streifenprojektionsscanner GOM ATOS II (links); Sechs-Punkt Biegeversuch mit Lasteinleitung in den Bauteilviertelspunkten. In der Mitte das Messfeld des Scanners (Mitte); Sandwichpaneel nach dem Versagen (rechts).

Der Einsatz von bislang drei unterschiedlichen Prüfmaschinen, von sowohl vertikalen als auch horizontalen Anordnungen der Prüflinge sowie von unterschiedlich ausgedehnten Messfeldern legten den Einsatz mobiler 3D-Scantechnik nahe. Das photogrammetrische Streifenprojektionssysstem GOM ATOS II wird gewählt, weil es die erforderliche Flexibilität im Instrumentenaufbau bietet, weil die erforderlichen Aufnahmezeiten pro Scan von etwa 15 bis 20s im Rahmen der Versuchsaufbauten akzeptabel sind und weil eine geometrische Auflösung bis deutlich unter den Zehntelmillimeter gefordert ist. Ein Belastungsversuch mit etwa 10-12 Stufen schrittweise wachsender Belastung bis zum Versagen des Bauteils kann mit diesem System incl. aller 10-12 Scansequenzen in insgesamt etwa 15-20 Minuten abgeschlossen werden.

Die Erfassung der absoluten Deckschichtbewegung durch die schrittweise gesteigerte Belastung ist hier nicht von Interesse. Das Bezugssystem wird daher direkt *auf* der Sandwichdeckschicht mittels Retrotargets als Passmarken definiert. Die Auswertesoftware setzt damit die wahre *Objektbewegung* in eine rein rechnerische *Sensorbewegung* um. Dieser Sachverhalt wurde vorab unter kontrollierten Rahmenbedingungen auf einer Richtplatte simuliert und bestätigt.

Die gescannten 3D-Punkte werden jeweils dreiecksvermascht und in die 2,5D-Rasterdatendarstellung eines digitalen Bildes mit 4Byte pro Stützstelle überführt. Um die Feinverformung der Deckschicht sichtbar zu machen, wird anschließend eine Differenzbildung der Ergebnisse unterschiedlicher Belastungsstufen eines Bauteils vorgenommen. Damit verbleiben in den Ergebnissen die Verformungen zwischen den Belastungsstufen, welche wiederum einer Frequenzanalyse unterzogen werden. Im Wesentlichen lassen sich nun die verbliebenen Verformungen in einen stark tieffrequenten Anteil, also eine Art globale Durchbiegung, sowie in das gesuchte hochfrequente Beulverhalten (vgl. Abb. 3) aufspalten.



Abb. 3: Beulverhalten nach der Differenzbildung mit Graustufen als Höhenwerte (links); Oberflächendarstellung mit theoretischer Wellenverformung (rechts)

Da sich die Sandwichpaneele je nach Zweck und Hersteller in ihrer Linierung stark unterscheiden, wurde für die sofortige Auswertung der Scans vor Ort das Bildverarbeitungspaket ImageJ (http://rsb.info.nih.gov/ij/) eingesetzt. Damit ergeben sich folgende Vorteile: Kleine Änderungen im Bildverarbeitungsprocedere können in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur der Paneele direkt vorgenommen werden; Anwender und Messdienstleister können durch den Freeware-Status der Software auf ein gemeinsames Verarbeitungstool zugreifen; die Programmiersprache Java erlaubt den Einsatz sowohl auf dem Linux-basierten Industrie-PC des GOM-Scansystems als auch auf der Windows-basierten Plattform des Anwenders; die Extraktion von Oberflächenprofilen und deren Export in die Tabellenkalkulation zum Zweck der Analyse z.B. via diskreter Fourier-Transformation ist per drag'n drop denkbar einfach und schnell. Ein Flaschenhals in puncto Rechenzeit (Java!) wurde durch die Implementierung separierter Filtermasken auf Basis einer Gaußpyramide beseitigt, [Weides 2003].

4 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Ziel der Untersuchung war es, die Verformung von druckbelasteten Deckschichtmembranen an Sandwichbauteilen zu bestimmen. Mit Hilfe von 3D-Scans wurden Sandwichelemente in Bauteilbiegeversuchen untersucht.

Mit Hilfe von 3D-Scans gelang es erstmals, die Beulverformungen in der druckbeanspruchten Deckschicht sichtbar zu machen. Es wird eine gute Übereinstimmung der theoretischen Beullänge (a) mit der experimentell gefundenen festgestellt. Die ermittelten Amplituden zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten, jedoch sind die Ergebnisse hier nicht so eindeutig. Kleine lokale Störungen führen zu teilweise starken lokalen Verformungen.

Für weitere theoretische Betrachtungen, so wie für Untersuchungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode bilden die angenommenen Verformungswerte eine gute Ausgangsbasis. Die Ergebnisse sollten jedoch mit anderen Paneelkonfigurationen (Art der Linierung und Art des Kerns) bestätigt werden.

Literatur:

- BÖHLER, W.; MARBS, A.[2002]: 3D Scanning Instruments. CIPA, Heritage Documentation, Intern. Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, 2002.
- LINKE, K.-P. [1978]: Zum Tragverhalten von Profilsandwichplatten mit Stahldeckschichten und einem Polyurethan-Hartschaum-Kern bei kurz- und langzeitlicher Belastung, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- MARBS, A. [2003]: Über Altes und Neues. 3D-Scanning im Bereich der Denkmalpflege. GeoBIT, S. 11-13, 11/2003.
- PLANTEMA, F.J [1966]: Sandwich Construction, The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates and Shells, John Wiley and Sons, New York, London, Sydney
- prEN 14 509 Self-supporting double skin metal faced insulating sandwich panels Factory made products Specification
- WEIDES, C. [2003]: Untersuchung des 3D-Scanners GOM ATOS II am Beispiel einer Deformationsanalyse im Submillimeterbereich. FH Mainz, Diplomarbeit Nr. 1592.

Anschriften:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Berner Dipl.-Ing. Lars Pfeiffer iS-mainz, Institut für Sandwichtechnik Prof. Dr.-Ing. Martin Schlüter Dipl.-Ing. Christian Weides i3mainz, Institut für raumbezogene Informations- und Messtechnik <u>schlueter@fh-mainz.de</u>

sandwich@fh-mainz.de schlueter@ Fachhochschule Mainz, Holzstraße 36, D-55116 Mainz