Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 136 (2010)
Heft: 18: Simulanten

Artikel: Durchschlagend stark
Autor: Kurath, Josef / Sturzenegger, Christoph / Henckel, Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-109604

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 05.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

DURCHSCHLAGEND STARK

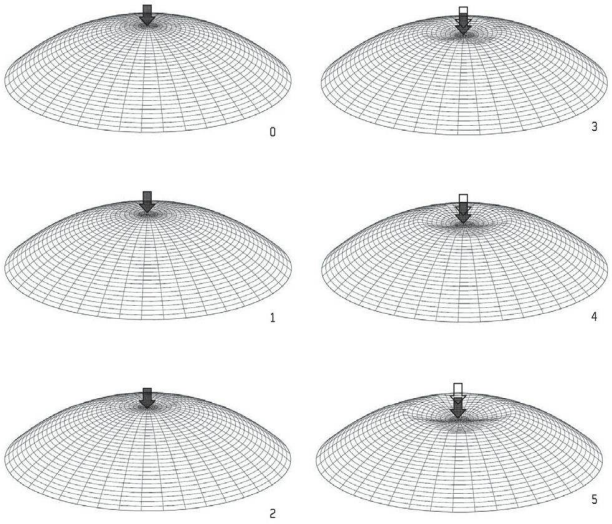
Dünnwandige Bauteile sind in der Lage, nach dem Erreichen der Stabilitätsgrenze unter Beibehaltung der Lasteinwirkung eine neue, statisch stabile Form anzunehmen. An solch verformten Strukturen kann die Belastung weiter gesteigert werden. Die numerische Simulation dieser Vorgänge verlangt nach einem Simulationsprogramm, das grosse Deformationen zulässt. Die gewonnenen Resultate zeigen sich verblüffend genau im Vergleich zu realen Versuchen.

Aufgrund von hohen Materialkosten, der Eigenschaften der Grundmaterialien und der zur Verfügung stehenden Produktionsverfahren ist es sinnvoll, Bauteile aus FVK dünnwandig auszuführen. Dies können plattenförmige Elemente, sphärisch gekrümmte Formen oder Sandwichbauteile sein. FVK-Bauteile können auch Querschnitte aufweisen, die vom Stahlbau her bekannt sind. Glasfaserverbundkunststoffe (GFK) haben im Verhältnis zu ihrer hohen Zug- und Druckfestigkeit eine relativ geringe Steifigkeit. Bei Profilquerschnitten, die aus dem Stahlbau übernommen werden, kann man die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften des Materials meist nicht nutzen. Die geringe Steifigkeit des Materials führt bei diesen gedrungenen Querschnittsformen zu hohen Verformungen oder zu Stabilitätsproblemen wie Kippen.[1] Das Gleiche gilt für schwach gekrümmte Schalenstrukturen. Auch hier kann die sehr hohe Druckfestigkeit des Materials nicht genutzt werden, weil das Stabilitätsproblem Beulen rasch eintritt. Für den Einsatz bei Membrantragwerken spricht die hohe Zugfestigkeit von GFK. Das Material ist jedoch bereits fast zu steif für diese Anwendung. Die Formgebung muss bei der Produktion erfolgen, was in vielen Fällen aufwendig ist.[2] Eine schlaffe Vorkonfektionierung ist nur in speziellen Fällen möglich. Die Verhinderung der Faltenbildung durch Überspannen bei ungenauer Formgebung oder bezüglich spezieller Lastfälle ist nicht oder nur mit grossem Aufwand möglich.

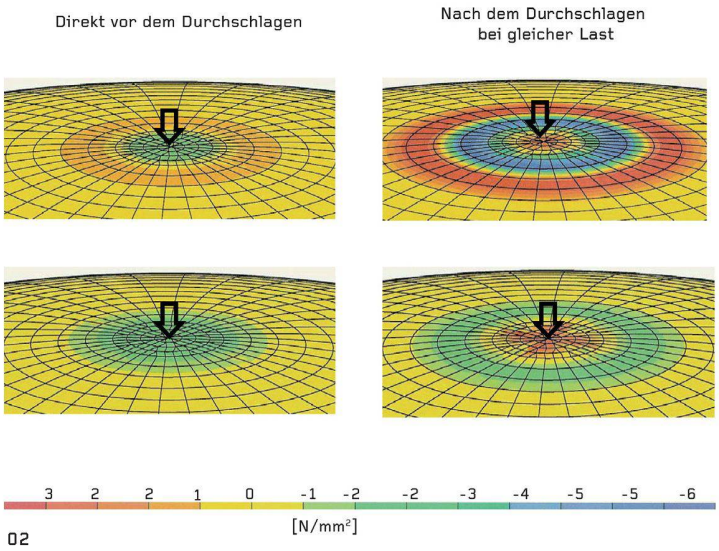
MATERIALSTÄRKEN BESTIMMEN TRAGWERKSFORMEN

Mithilfe von Versuchen und Computersimulationen wird aufgezeigt, dass die speziellen Eigenschaften von GFK bezüglich der hohen Druck- und Zugfestigkeit bei gleichzeitig kleinem Elastizitätsmodul für eine neue Gruppe von Tragwerken gut geeignet sind: sogenannte «membrankraftunterstützte druckbeanspruchte Tragwerke (mdT)». Dies sind hauptsächlich auf Druck beanspruchte Tragwerke oder Tragwerksteile, die bei hohen Lasteinwirkungen aufgrund grosser Verformungen (Beulen) durch Membrankräfte stark unterstützt werden. Teilweise werden so aus druckbeanspruchten Bereichen bei einem höheren Stabilitätszustand zugbeanspruchte Bereiche.

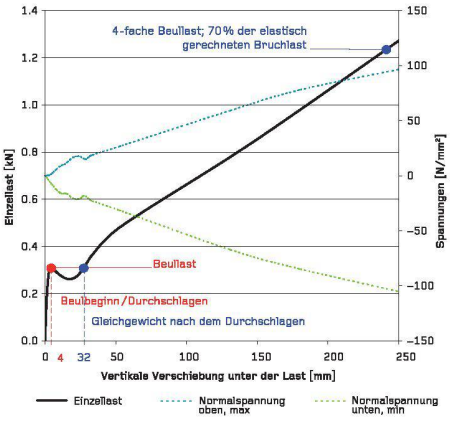
Zum Beispiel hat eine dünnwandige GFK-Schale die Eigenschaft, dass auch grosse Beulen eine rein elastische Verformung darstellen. Das heisst, bei Entlastung bilden sich die Beulen wieder zurück, ohne dass eine Materialschädigung aufgetreten ist. Die Stabilität der verformten Schale (mit Beulen) ist grösser als in der ursprünglichen Form.[3] Ein ähnliches Phänomen kennt man von dünnwandigen Stahltragwerken (z. B. dünnwandige Rohre). Nur bilden sich bei Stahltragwerken aufgrund der hohen Steifigkeit bei Entlastung die Deformationen meist nur wenig zurück. Für die Gebrauchstauglichkeit sind solch bleibende plastische Verformungen meist nicht erwünscht und werden in der Regel mit konstruktiven Elementen verhindert. Zudem ist das Ermüdungsverhalten im plastischen Bereich nicht vorteilhaft.



01



02



03

01 Drahtmodell mdT-Kuppel
Zustand 0: Grundform ohne Punktlast
Zustand 1: Einzellast 320N kurz vor dem Durchschlagen
Zustand 2: nach dem Durchschlagen ohne weitere Laststeigerung
Zustände 3–5: sukzessive Laststeigerung bis 1300 N und mit der entsprechenden Beule mit 2.3 m Durchmesser und 220 mm negativer Pfeilhöhe
02 Normalspannungen mdT-Kuppel
Entsprechend den Zuständen 1 und 2 der Abbildung 01, oben Ringspannungen, unten Meridianspannungen
03 Diagramm mdT-Kuppel
Darstellung des Tragverhaltens, linke Ordinate mit Wert der Einzellast in kN, rechte Ordinate mit Werten der Normalspannungen infolge Normalkraft und Biegung, Abszisse mit Werten der vertikalen Verschiebung der Kuppelspitze
(Grafiken: ZHAW)

COMPUTERSIMULATION DER MDT-BAUWEISE

Mit den im Bauwesen üblichen Berechnungsprogrammen können grosse Beulvorgänge nicht simuliert werden. Für die Berücksichtigung dieser Effekte muss Simulationssoftware herangezogen werden, die Kraftumlagerungen infolge grosser Verformungen im statischen Modell korrekt berücksichtigen. Das Rechnen mit solchen Programmen ist auch heute noch kompliziert. Der Aufwand lohnt sich jedoch, da die mdT-Effekte sehr gut simuliert werden können. Beim hier eingesetzten Programm FEnas[4] muss man in einem ersten Schritt den massgebenden Beulzustand ermitteln. In einem zweiten Schritt kann mithilfe dieser Beulform weitergerechnet werden. Mit verschiedenen kraftgesteuerten respektive deformationsgesteuerten Strategien können die weiteren Laststufen gerechnet werden. In gewissen Fällen entscheidet das Programm selbstständig zwischen den Strategien und erhöht die Last korrekt bis zum Bruchwert. Meist muss jedoch vom Simulanten in den Rechenprozess eingegriffen werden. Vergleicht man die erhaltenen Resultate mit durchgeführten Versuchen, sind die Ergebnisse sowohl bei den Spannungen, bei den Gesamtverformungen und auch bei der Form respektive bei den Abmessungen der Beulen verblüffend genau.

SIMULATION EINER MDT-KUPPEL

Das simulierte Kuppelmodell aus GFK-Laminat hat einen Durchmesser von 6 m, eine Wandstärke von 3 mm und eine Pfeilhöhe von 1 m. Die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit des GFK-Laminates liegt bei 150 N/mm². Die Kuppel wird mittig mit einer Einzellast beansprucht. In der ersten Phase verhält sich die mdT-Kuppel bis zu einer Last von 320 N als Schalentragwerk. Die Hauptauswirkungen sind Druckkräfte, die nur durch kleine Momente überlagert werden. Die Spannungen im Laminat liegen im Bereich von –8 bis +2 N/mm², und die vertikale Verschiebung in der Kuppelmitte beträgt 4 mm. Wird diese Last (Beullast) überschritten, schlägt die Kuppelkappe durch und erhält bei gleicher Belastung eine absolute vertikale Verschiebung von 29 mm. Es entsteht plötzlich eine sehr grosse Beule mit einem Durchmesser von 60 cm und einer negativen Pfeilhöhe 26 mm. Am Rand dieser Beule entsteht ein Druckring, der im Querschnitt stark gekrümmt ist. Aufgrund dieser starken Querkrümmung können hohe Druckkräfte in Ringrichtung übernommen werden. Diese Querkrümmungen führen aber auch zu relativ grossen Biegespannungen, und diese erzeugen schlussendlich auch die maximalen Spannungen im Laminat. Zur Mitte hin (in Meridianrichtung) bildet sich aus der Schale eine Membran. Die mittleren Membranspannungen sind mit rund 4 N/mm² ebenfalls sehr klein. Überlagert mit den Biegespannungen, ergeben sich in der Membran

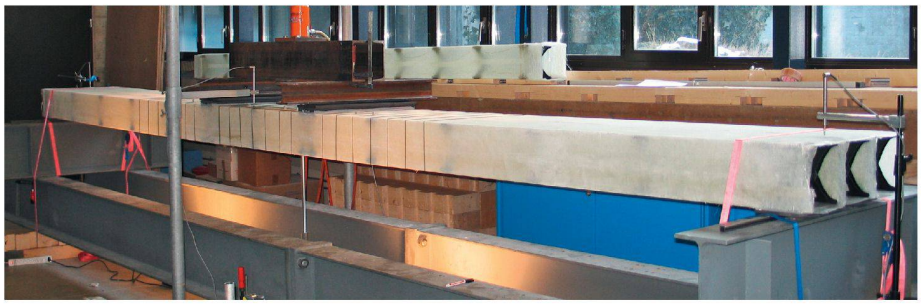
Oberflächenspannungen von bis zu 20 N/mm^2. Auch diese Werte sind noch weit vom elastischen Tragwiderstand des Materials entfernt. Die Einzelkraft kann nun weiter bis über 1300 N (4-fache Beullast) gesteigert werden. Die vertikale Verschiebung nimmt dabei unter der Laststeigerung praktisch linear zu und erreicht einen absoluten Wert von ca. 250 mm. Bis hierhin hat sich die mdT-Kuppel rein elastisch verhalten. Die Beule mit einem Durchmesser von 2.3 m und einer negativen Pfeilhöhe von 22 cm verschwindet bei Entlastung wieder, ohne dass zwischenzeitlich ein schädigender Zustand im Laminat aufgetreten ist. Obwohl sich bei höherer Belastung die Form des Druckringes zu einem Mehreck verformt, zeigen die Berechnungen, dass dieser äusserst stabil ist. Es ist zu erwarten, dass das eigentliche Versagen der mdT-Kuppel nicht infolge eines Stabilitätsproblems auftritt, sondern aufgrund des Biegeversagens des Laminates. Es ist jedoch anzumerken, dass bei einer langfristigen Belastung (Last höher als die Beullast) aufgrund von Kriechen leichte, bleibende Verformungen zurückbleiben würden oder dass bei einer sehr ungünstigen Tragwerksform die Beule nicht mehr zurückschlagen könnte.
Das Zulassen von solchem Durchschlagen unter Nutzlast wird in der heutigen Baupraxis kaum gefragt sein. Aber die Möglichkeit, eine stabile Form durch eine entsprechende ständige Belastung oder eine Vorspannung zu «erzwingen», könnte im Zusammenspiel mit dünnwandigen Bauteilen durchaus interessante Tragwerke ergeben.

VERSUCH UND SIMULATION AM PLATTENSCHEIBENMODUL PSM

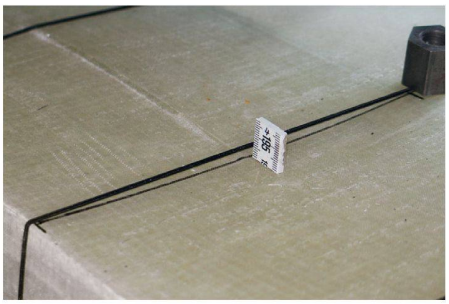
Zur Überprüfung der Verformungen und des Tragwiderstandes der PSM-Bauplatte[5] wurde ein Grossversuch durchgeführt und dieser mit einer Computerberechnung simuliert. Wie das Lastverformungsdiagramm zeigt, stimmen die im Versuch gemessenen und die in der Simulation gerechneten Werte gut überein. Nach dem Erreichen des linearelastisch gerechneten ersten Beulwertes, bei einer Last von rund 9.5 kN, nimmt die Steifigkeit des Tragwerkes ab. Das Versagen tritt erst beim 2.3-fachen Beulwert ein. Dies entspricht relativ genau der Beultheorie, die in den SIA-Normen für den Stahlbau angewendet wird. Dabei beruht das Versagen nicht auf einem Stabilitätsproblem des Druckgurtes, sondern auf dessen Druckversagen. Die Simulation zeigt, dass die Druckfestigkeit im Druckgurt bei den Stegen überschritten wird. Beim Versuch konnte dies bisher nicht mit letzter Gewissheit bestätigt werden, da während des Druckversagens des Laminates ein örtliches Stabilitätsproblem eintritt und diese zwei Effekte sehr schnell hintereinander oder evtl. miteinander auftreten. Die Berechnungen zeigen, dass nach dem Beginn des Beulens quer zur Hauptdruckrichtung im Druckgurt Membranspannungen entstehen, die stützend wirken. Bei kontinuierlicher Steigerung der Last werden die Beulen ebenfalls kontinuierlich grösser. Durch das Grösserwerden der Beulen wird der Druckgurt durch die Membrankräfte ebenfalls stärker gestützt. Aus diesem Grund erfolgt auch kein plötzliches Stabilitätsversagen, sondern der Gesamtbalken zeigt bis zum Bruch ein elastisches Biegeverhalten. Fährt man mit den Lastzyklen wieder zurück auf den Nullpunkt, sind auch die Verformungen nicht mehr vorhanden. Die Versuche haben gezeigt, dass die typische Geräuschentwicklung (Knistern) bei FVK-Konstruktionen, die bei grossen Belastungen auftritt, erst kurz vor dem Versagen des Trägers zu hören ist. Dies bestätigt das gute elastische Verhalten, auch bei sehr grossen Beulen der PSM-Platte. Es bestätigt auch, dass keine Spannungsüberschreitungen während der Laststeigerung aufgetreten sind, wie dies die Computersimulation ebenfalls berechnet hat. Mit der Nachrechnung von verschiedenen Druckgurtstärken wird aufgezeigt, wie sich der Bruchwiderstand, aber auch der Beginn des Beulens im Verhältnis zur Druckgurtstärke verändert (vgl. Abb. 8).

SIMULATIONEN SPAREN ENTWICKLUNGSZEIT

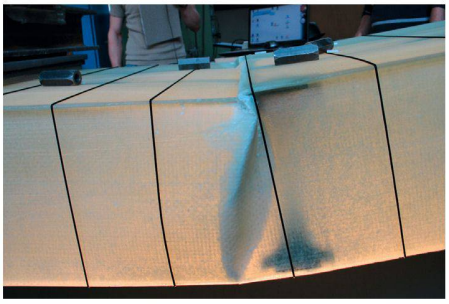
Mit diesen Computersimulationen wird aufgezeigt, dass mdT-Konstruktionen aus GFK trotz sehr dünnwandigen druckbeanspruchten Bauteilen ein gutmütiges Tragverhalten aufweisen, denn die analysierten Bauwerksformen haben nicht aufgrund eines Stabilitätsproblems plötzlich versagt. Durch Veränderung des statischen Tragwerkmodells während der Laststei-



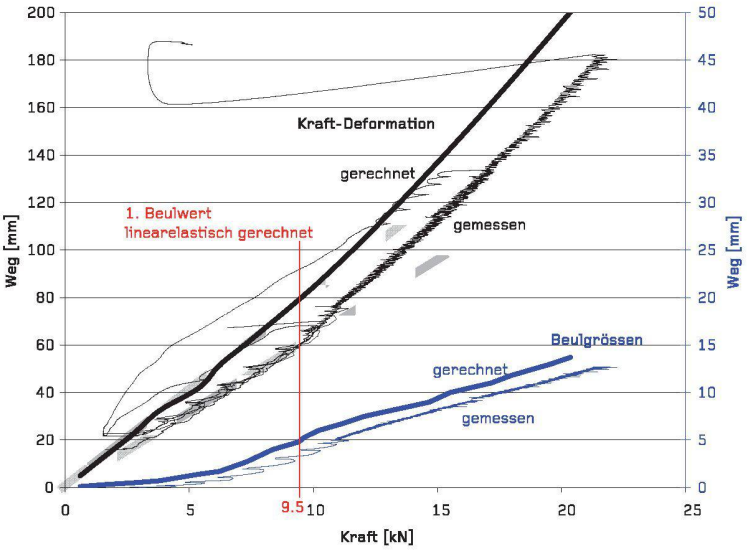
04



05



06



07

Druckgurt-stärke	Beullast	Bruchlast	Beulgrösse vor dem Bruch
2 mm	2 kN	9.3 kN	11 mm
4 mm	8 kN	22.2 kN	16 mm
6 mm	24 kN	33.6 kN	18 mm

08

04 Versuchsanordnung PSM: Länge 6 m, Breite 0.6 m (3 Kammern) und 2 Einzellasten jeweils gleichmässig über die Balkenbreite verteilt
05 Beulen während der Biegebelastung: Mit dem schwarzen Faden wird das unverformte Raummass dargestellt
06 PSM nach dem Versagen des Druckgurtes: Die Beulen im Steg und im Druckgurt sind wieder verschwunden
07 Vergleich PSM: Versuch – FEnas-Simulation bei einer Druckgurtstärke von 4 mm, Beulbeginn, Beulgrössen und Steifigkeitsänderungen stimmen sehr genau überein
(Fotos/Grafik/Tabelle: ZHAW)
08 Einfluss der Druckgurtstärken beim PSM; Lasten unmittelbar beim Beulen, Bruchlasten und zugehörige Beulgrössen resp. zugehörige Stichmasse der Beulen vor dem Bruch

WIRTSCHAFTSPARTNER

Hauptfinanzierungspartner:
Swissfiber AG, Zürich
Baseli Giger, Peter Aeschlimann
Finanzierungspartner:
Walter Mäder AG Kunstharze, Killwangen
Urs Haller
Sika Schweiz AG, Zürich
René Ganz
Mitfinanzierung durch die Förderagentur für Innovation – KTI – des Bundesamtes für Berufsbildung und Technologie BBT

gerung wird das Bauwerk weicher. Dies kann bei statisch unbestimmten Systemen für eine Kraftumlagerung genutzt werden.[1] Da nach dem Beulen meist eine hohe Tragsicherheit gewährleistet ist und sich die Beulen in einem sehr weiten Bereich rein elastisch verhalten, kann für verschiedene Gebrauchszustände das Beulen ebenfalls erlaubt werden, wenn die Nutzung dadurch nicht eingeschränkt ist. Mit den mdT-Tragwerken ist ein materialgerechter Bauwerkstyp gefunden, der für GFK-Tragstrukturen ein sehr interessantes Feld darstellt. Tragwerke in GFK können wesentlich wirtschaftlicher dimensioniert werden, ohne dass ein Tragsicherheitsrisiko eingegangen wird. Das Versuchslabor im Computer ist heute ein unverzichtbarer Bestandteil der Forschung und Entwicklung im Bauwesen. Mithilfe dieser Strukturanalysen können Konzepte und Vorgänge schnell und relativ einfach einer Prüfung unterzogen werden. Dennoch werden reale Versuche zur Kontrolle von Simulationsresultaten auch weiterhin dazugehören.

Josef Kurath, josef.kurath@zhaw.ch, Prof. dipl. Bauingenieur ETH/SIA
Christoph Sturzenegger, christoph.sturzenegger@zhaw.ch, dipl. Bauingenieur FH/EMBA
Peter Henckel, peter.henckel@zhaw.ch, dipl. Bauingenieur

Anmerkungen
1 Josef Kurath: «Faserverstärkter Biegeträger für Tragstrukturen», in ZHW-Info, 22.11.2004
2 Pavillon «Les échanges», Expo64, Lausanne; Heinz Hossdorf: Das Erlebnis Ingenieur zu sein. Birkhäuser, 2003, ISBN 3-7643-6050-X
3 «Entwicklung eines neuen Biegeträgers für den tragenden Baubereich», Vortrag Josef Kurath; 11. Internationale AVK-Tagung, 22.–23.9.2008, Essen (D)
4 Computersoftware FEnas; Walder + Trüeb, www.waldertrueb.ch
5 Josef Kurath, Alexis Ringli, Christoph Sturzenegger: «Starker Verbund, Fussgängerbrücke in FVK/Stahl-Verbundbauweise», in TEC21 3-4/2010