

Automatisierte Parameterstudien in der Finiten-Elemente-Analyse zur Verbesserung des Leichtbaupotenzials von Sandwichstrukturen

Frank Rudolph, Felix Viebahn, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth

E-Mail: frank.rudolph@uni-bayreuth.de; Internet: <http://www.lscad.de>

Inhalt: Dieser Beitrag stellt einen automatisierten Strukturgenerator aufbauend auf der Finite-Elemente-Analyse Software Z88Aurora vor, der es durch automatisiertes Preprocessing ermöglicht, einen nach ASTM C393-00 genormten Vierpunkt-Biegeversuch eines Prüfkörpers zu simulieren. Dieser Prüfkörper besteht aus einem durch Harzinfiltration hergestellten Sandwichmaterial, in dessen Kern durch Einschnitte stabile Harzstege, im Folgenden auch Versteifungen genannt, eingebracht werden. Im Rahmen einer Parameterstudie werden die Möglichkeiten dieses Strukturgenerators dargestellt und der Einfluss der Anzahl dieser Versteifungen in Längen- und Breitenrichtung auf die Biegeeigenschaften des Prüfkörpers untersucht.

Abstract: This publication presents a software tool that acts as an automated preprocessor based on the Finite-Element-Analysis software Z88Aurora. This tool enables the simulation of four-point bending tests according to ASTM C393-00. The test specimen is set up as a standardized sandwich structure that features resin-filled cuts in the core material. To further demonstrate the capabilities of the software tool, a variation of parameters is executed to explore the influence of these cuts on the specimen's bending stiffness by varying the number of cuts along the length and width of the specimen.

Stichwörter: Finite-Elemente-Analyse, Leichtbau, Sandwichkonstruktionen, Z88Aurora, Z88RS

Keywords: Finite-Element-Analysis, lightweight construction, sandwich material, Z88Aurora, Z88RS

1 Einleitung

Erneuerbare Energien zur Schonung der Umwelt und zur Schaffung einer Nachhaltigkeit schöpfen aus dem wissenschaftlichen Stand aller Bereiche der modernen Technik. Weniger modern aber effizient ist die Nutzung von Windenergie zur Erzeugung von Strom. Sie ist neben der Solarenergie eine der Säulen bei der „grünen“ Revolution. Die Weiterentwicklungen im Windenergiebereich sind geprägt vom Leichtbau [1]. Durch die Reduzierung von Gewicht erreicht man eine Erhöhung der Nutzleistung indem größere

Turmhöhen und damit einhergehend größere Windkraftflügel zum Einsatz kommen. Die Windkraftflügel werden in Sandwichbauweise gefertigt. Dieses Sandwichmaterial besteht aus zwei Deckschichten und einem Balsaholz- oder Schaumkern. Die Deckschichten bestehen wiederum aus einem Lagenaufbau aus Wirrfasermatten und Gewebelagen aus Glasfasern. Dabei nehmen die Deckschichten die Zug- und Druckspannungen auf, während die Kernschicht primär auf Schub belastet wird. Der trockene Sandwichaufbau wird dann mit einem Epoxidharz infiltriert. Werden vor der Infiltration Schnitte durch Sägen oder Messer in den Schaumkern eingebracht, werden diese bei der Infiltration mit Harz gefüllt und bilden stabile Versteifungen aus, die die Biegesteifigkeit des Sandwichaufbaus beeinflussen [2], [3].

Dieser Einfluss soll nun durch die Entwicklung eines automatisierten Präprozessors, genannt Z88SandwichSIM, aufbauend auf der Finite-Elemente-Analyse (*FEA*) Software *Z88Aurora* untersucht werden. Im Folgenden werden mittels einer Parameterstudie die Anzahl der Versteifungen in Längen- und Breitenrichtung variiert und anhand eines an [4] angelehnten Vierpunkt-Biegeversuchs die Steifigkeit ausgewertet.

2 Vorteile einer graphischen Benutzeroberfläche

Der in [2] vorgestellte Strukturgenerator wird mittels Konsole oder durch Doppelklick ausgeführt. Als Eingabedaten dienen Informationen innerhalb der Textdatei *Input.txt*. Geometrie-, Vernetzungs- und Materialparameter sind manuell zu editieren. Die Benutzerfreundlichkeit ist dadurch sehr eingeschränkt, was vor Allem bei der Erstellung mehrerer Konfigurationen ineffektiv ist. Mit der graphischen Benutzeroberfläche des Strukturgenerators, siehe Abbildung 1, sind alle wesentlichen Eingabewerte übersichtlich angeordnet und leicht veränderbar.

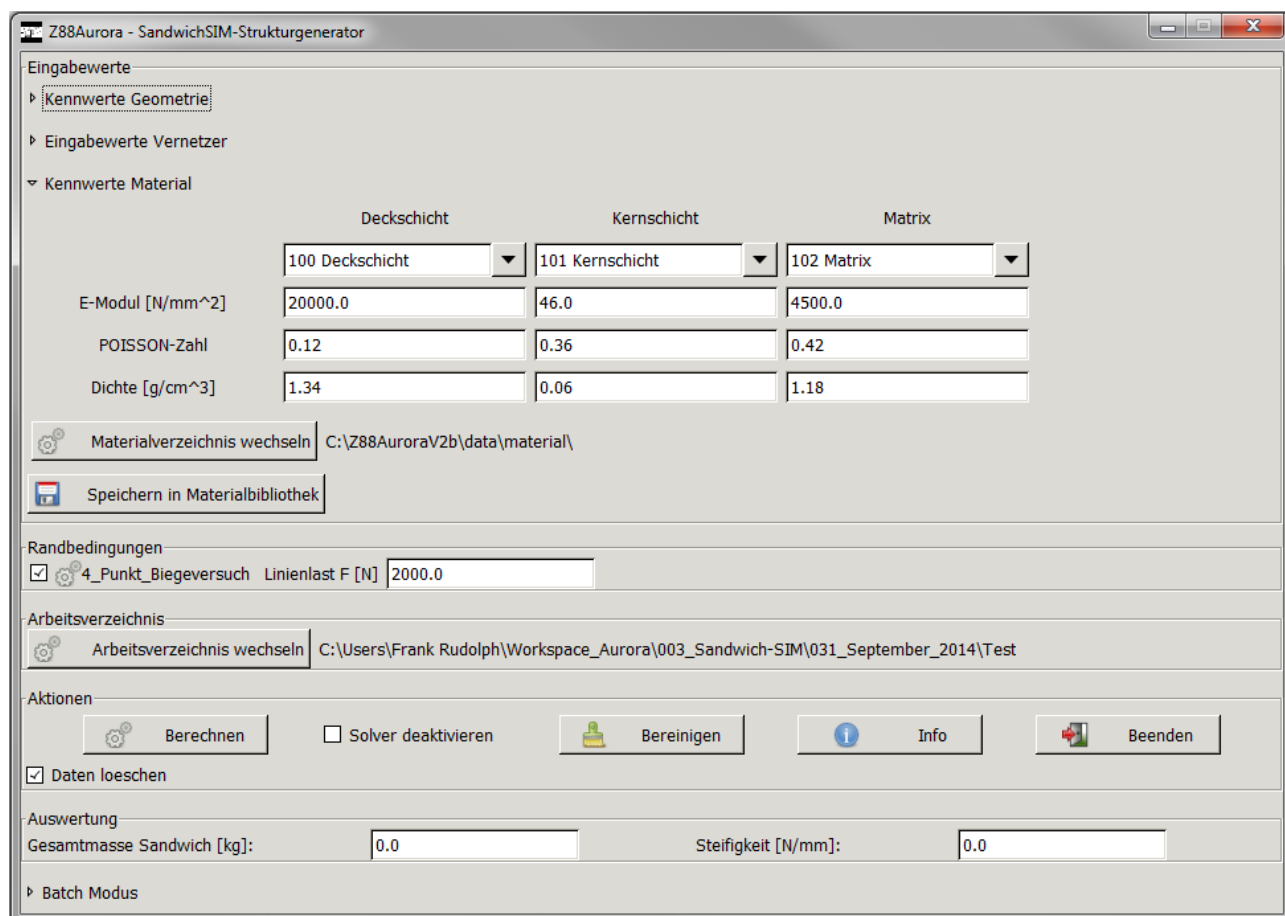


Abbildung 1: Graphische Benutzeroberfläche von Z88SandwichSIM

Vorteile sind u.a. die leichte Editierbarkeit der Eingabewerte, zusätzliche graphische Informationen und das direkte Ansteuern des *FE*-Solvers *Z88RS* nach [5]. Diente der Strukturgenerator als reines Werkzeug für ein erleichtertes *Preprocessing*, sind Masse und Steifigkeit, der eingestellten Konfiguration, per Mausklick ermittelbar.

3 Softwaretechnische Umsetzung der automatisierten Parastudien

Die Integration des *FE*-Solvers *Z88RS* innerhalb der Benutzeroberfläche bietet vielmehr den Vorteil der Automatisierbarkeit für Parameterstudien. Dem Flussdiagramm in Abbildung 2 entnehmend, können mehrere Berechnungen sequentiell abgearbeitet werden. Die benötigte Variation der Kennwerte gibt der Benutzer vor.

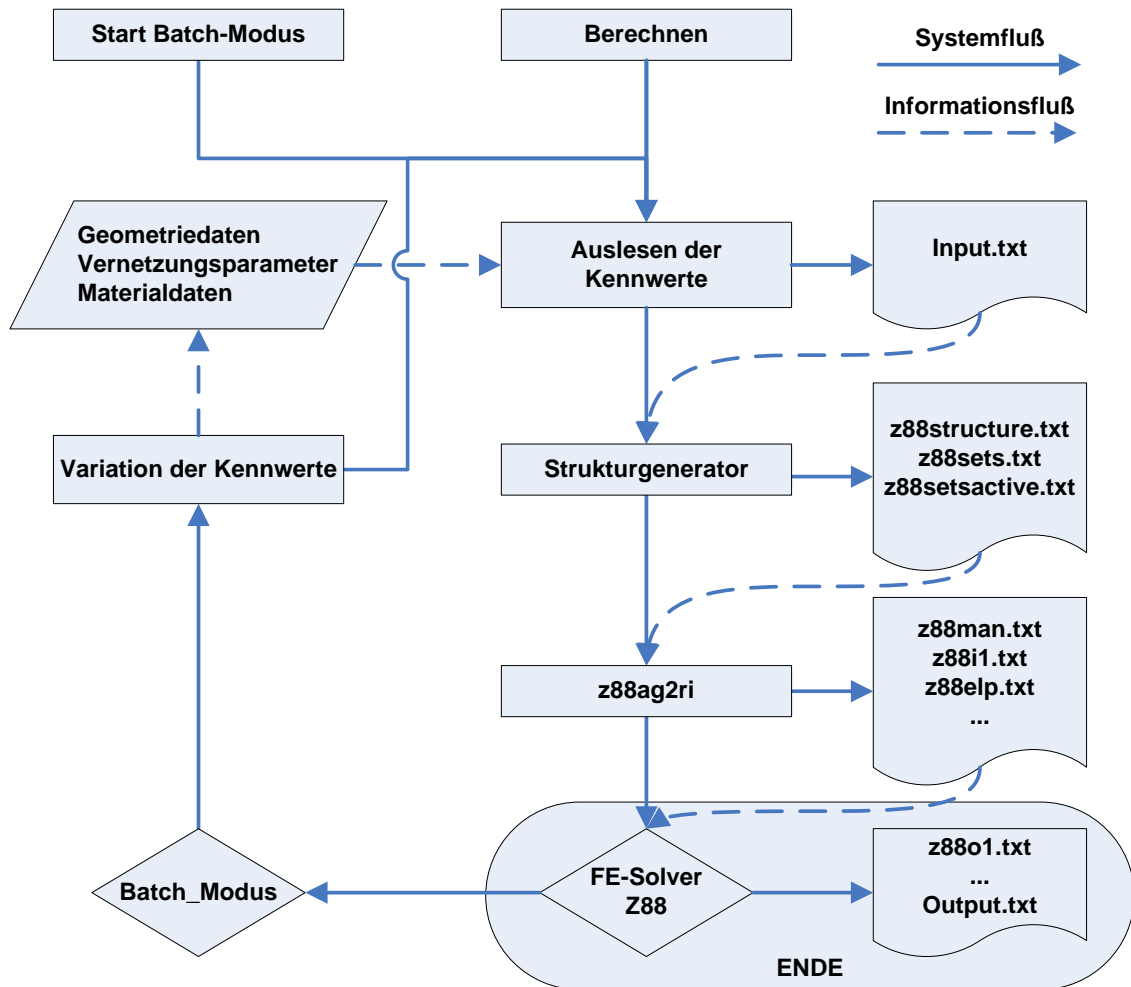


Abbildung 2: Flussdiagramm der Benutzeroberfläche

Möchte man die Anzahl der Versteifungen in Breitenrichtung von 1 bis 10 und die in Längenrichtung von 1 bis 20 variieren, sind 200 Berechnungen durch die Software automatisiert handhabbar. Das zeitliche ineffiziente Preprocessing wird auf ein Minimum reduziert, die Benutzerfreundlichkeit wiederum gesteigert.

Seitens der verwendeten Software kam die imperative Programmiersprache C zum Einsatz. Die Erstellung der graphischen Benutzeroberfläche erfolgte unter Gebrauch der freien Komponentenbibliothek *GTK+* [6], [7], [8]. Die Eingabewerte sind innerhalb sogenannter *Expander* angeordnet. Dies bietet den Vorteil unwesentliche Eingabefelder auszublenden. Beim Starten der Software sind die insgesamt 21 Eingabefelder ausgeblendet, was dem Benutzer die Orientierung erleichtert. Mit der vorgegebenen Grundeinstellung besteht die Möglichkeit, ohne weitere Editierung von Eingabewerte, eine komplette Simulation inklusive Auswertung durchzuführen.

Nach der Initialisierung der Simulation werden sämtliche Eingabefelder ausgelesen und als Textdatei, im angegebenen Arbeitsordner, gespeichert. Der Strukturgenerator liest die Daten ein, verarbeitet Sie zur Sandwichstruktur mit Randbedingungen für den Vierpunkt-Biegeversuch und hinterlegt die Daten, kompatibel für das freie *FE*-Programm *Z88AuroraV2*. Der implementierte *FE*-Solver *Z88RS* lässt sich in *Z88SandwichSIM* deaktivieren. Somit besteht die Möglichkeit für den Benutzer die generierte Struktur in *Z88AuroraV2* einzulesen und die Schritte *Solving* und *Preprocessing* manuell abzuschließen. Ziel von *Z88SandwichSIM* ist jedoch nicht die Auslagerung der letztgenannten Schritte für die komplette Simulation.

Die hinterlegte virtuelle Sandwichstruktur wird mittels *z88ag2ri* für den Solver *Z88RS* konvertiert. Dieser benötigt zum Aufruf eine ursprünglichere Datenstruktur. Die Informationen u.a. für Geometrie-, Material- und Elementparameter sowie Integrationsordnung stehend abschließend in Textdateien zur Verfügung. Nach erfolgreichem *Solving* stehen Informationen u.a. zu Verschiebungen und Spannungen in den *z88oX.txt*-Dateien zur weiteren Verwendung bereit. Für den Benutzer, zur leichteren Auswertung, sind Masse und Steifigkeit der Sandwichkonfiguration in der *Output.txt* hinterlegt. Die Werte erscheinen ebenfalls in der Benutzeroberfläche. Seit Initialisierung der Simulation ist seitens des Benutzers keine weitere Handhabung von Nöten.

Die automatisierten Parameterstudien, hier Batch-Modus genannt, benötigen lediglich eine Variation der gewünschten Parameter. Dies wurde mittels Schleifen in C realisiert. Dafür werden alle benötigten Daten in nachvollziehbare Unterordner gespeichert, konvertiert, die eigentliche Simulation gestartet und ausgewertet. Zur besseren Auswertung der vielzähligen *Output.txt*-Dateien erfolgt abschließend eine Zusammenfassung aller Konfigurationen als *Ergebnisse.txt*. Externe Programme zur Datenaufbereitung finden final, manuell gesteuert durch den Benutzer, Verwendung. Die Möglichkeit der automatisierten graphischen Auswertung, beispielsweise mit *gnuplot*, besteht [9].

4 Parameterstudien der Versteifungen mit Z88SandwichSIM

Für die Durchführung der Parameterstudie wurden vom automatisierten *Preprocessing* des Strukturgenerators die Anzahl der Versteifungen in Längen- und Breitenrichtung variiert und die Randbedingungen für die *FEA* entsprechend dem Vierpunkt-Biegeversuch nach *ASTM C393-00* [4] festgelegt. Der Nomenklatur der Modellbildung folgend zeigt

Abbildung 3 eine Probe mit 19 Versteifungen in Längen- (L19) und 3 Versteifungen in Breitenrichtung (B3). Bei den folgenden Untersuchungen wurde als Kernmaterial ausschließlich Polyvinylchlorid (PVC)-Schaum untersucht, da dieser im Vergleich zu Polyethylenterephthalat *PET*-Schaum isotrope Materialeigenschaften aufweist [3].

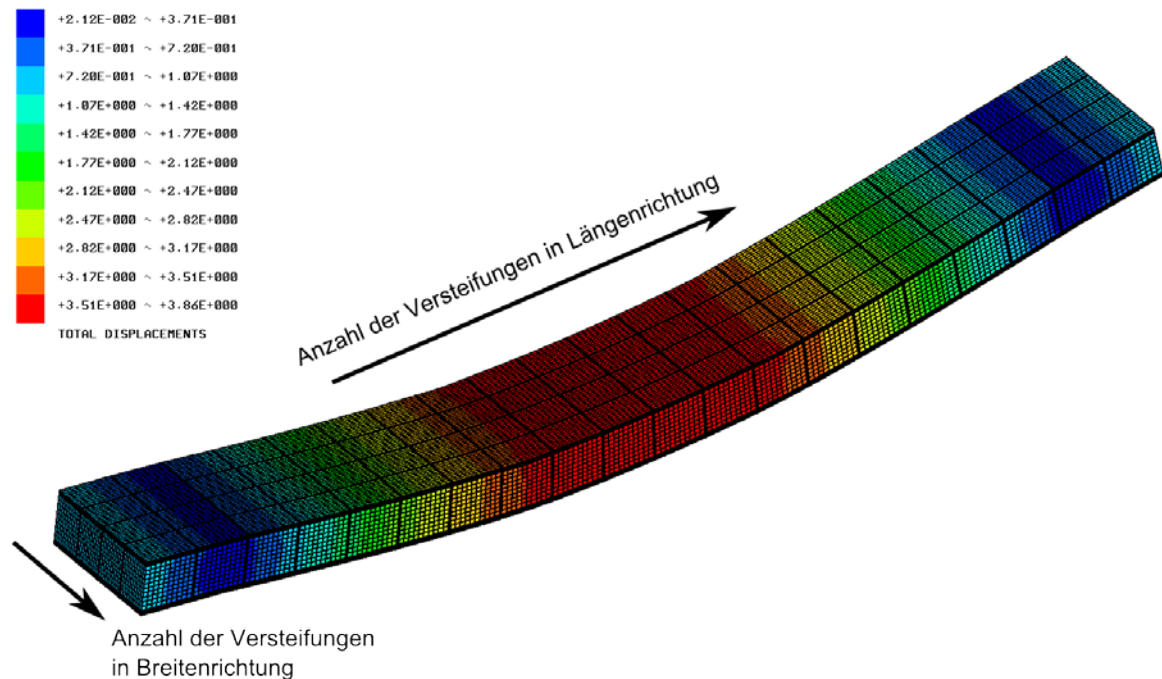


Abbildung 3: Prüfkörper und Definition der Richtungen

Die Auswertung erfolgte anhand der Steifigkeit C , die den Quotienten aus der Prüfkraft F und der maximalen Verschiebung u_{max} der Probe darstellt. Um eine Aussage über das Leichtbaupotential einer Variante treffen zu können, wurde mit der Gesamtmasse m des Sandwichkörpers die spezifische Steifigkeit C_{spez} nach (1) eingeführt.

$$C = \frac{F}{u_{max}}, \quad C_{spez} = \frac{C}{m} \quad (1)$$

Die beiden Versteifungsgeometrien *Saw Cut* und *Knife Cut* unterschieden sich durch ihre jeweilige Schnittbreite s (s. Abbildung 4). Der *Saw Cut* besitzt eine Schnittbreite $s = 1,2 \text{ mm}$, für den *Knife Cut* gilt $s = 0,2 \text{ mm}$. Aus fertigungstechnischen Gründen wird bei beiden Varianten ein Steg von 1 mm belassen.

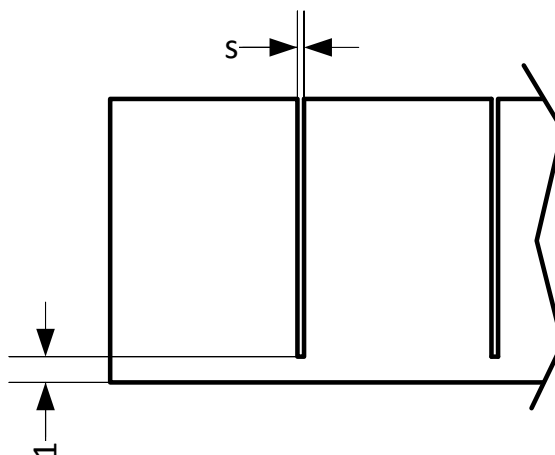


Abbildung 4: Schnittgeometrien im Schaumkern

In Abbildung 5 sind die (spezifischen) Steifigkeitswerte für eine *PVC Saw Cut* Probe mit 3 und 6 Verstärkungen in Längsrichtung (L3 und L6) in Abhängigkeit von der Anzahl der Verstärkungen in Breitenrichtung aufgetragen.

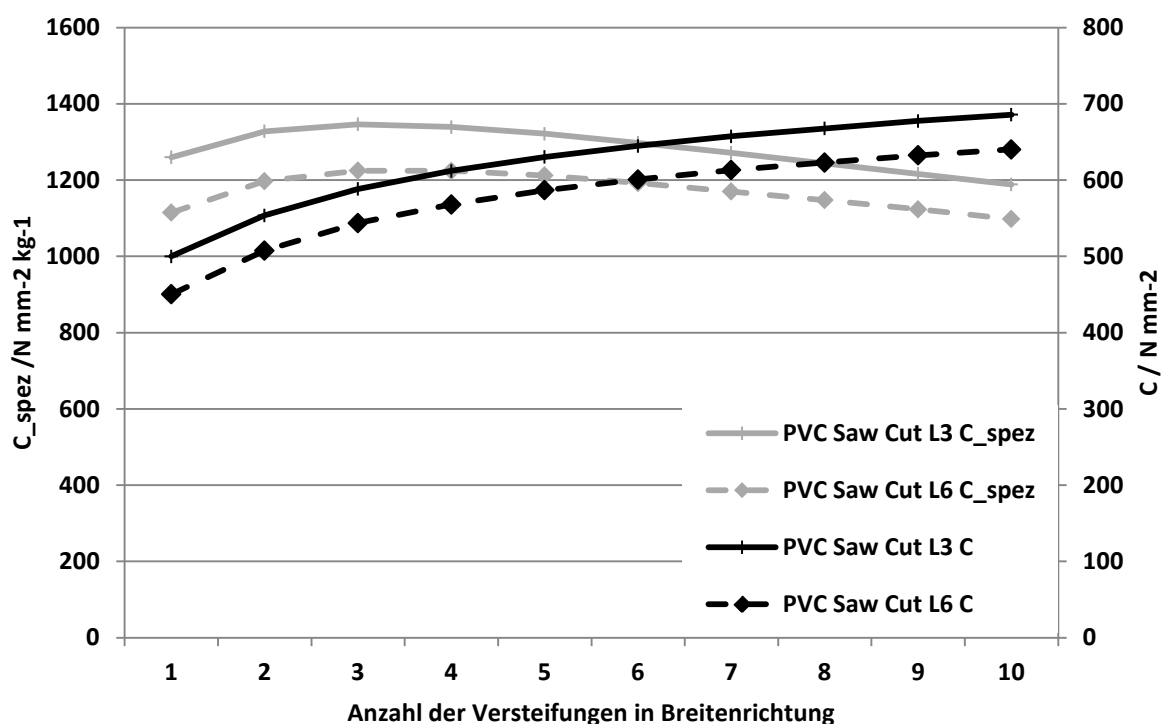


Abbildung 5: Einfluss der Verstärkungen in Breitenrichtung (Saw Cut)

Es zeigt sich, dass die Steifigkeit einer Probe mit zunehmender Anzahl der Verstärkungen zunimmt, was auf Grund der Orientierung der Verstärkungen im Prüfkörper

zu erwarten war. Die höhere Dichte des Matrixmaterials führt jedoch zu einer schwereren Probe, weshalb die optimale spezifische Steifigkeit bei 3 Versteifungen erreicht ist. Dieses Optimum gilt für beide Proben, unabhängig von der Steganzahl in Längsrichtung. Zusätzlich ist offensichtlich, dass sich die höhere Anzahl von Versteifungen in Längsrichtung negativ auf die Biegesteifigkeit einer Probe auswirkt. Die Verdoppelung der Steganzahl von 3 auf 6 führt lediglich zu einem Massezuwachs der Probe und somit zu einer Senkung der spezifischen Biegesteifigkeit.

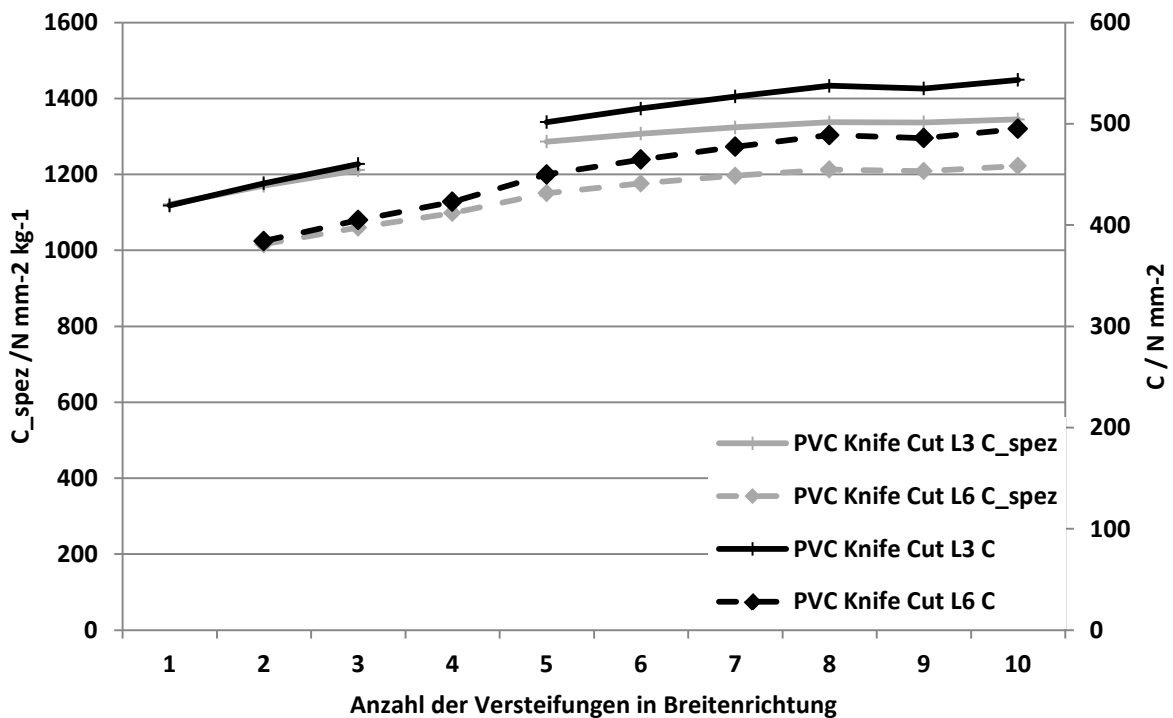


Abbildung 6: Einfluss der Versteifungen in Breitenrichtung (*Knife Cut*)

Abbildung 6 zeigt die gleiche Grafik für die Variante *Knife Cut*. Die teilweise fehlenden Werte für die Varianten mit 1 bzw. 4 Versteifungen in Breitenrichtung sind durch eine fehlerhafte Vernetzung zu erklären, die eine erfolgreiche Berechnung der jeweiligen Variante verhinderte. Für diese ersten Untersuchungen ist dies jedoch nicht entscheidend, da dennoch ein ähnlicher Trend wie bei der Variante *Saw Cut* festgestellt werden kann: Die Steifigkeit C der Proben steigt mit zunehmender Steganzahl in Breitenrichtung. Abweichend von Abbildung 5 wird hier jedoch kein Maximum der spezifischen Steifigkeit C_{spez} erreicht. Rein rechnerisch liegt dies bei der sechsfachen Anzahl von Versteifungen wie bei der Variante *Saw Cut*, da diese sechsmal so breit wie die Variante *Knife Cut* ist

(vgl. Abbildung 4). Obwohl diese Lösung von dem Standpunkt der *FEA* aus betrachtet theoretisch möglich ist, ist diese fertigungstechnisch kaum umsetzen, da diese auf einer Probenbreite von 50 mm 18(!) Schnitte erfordert. Darüber hinaus würde diese hohe Anzahl von Schnitten einen überhöhten Massezuwachs der Probe hervorrufen, da über die größere Schnittfläche zum restlichen Kernmaterial übermäßig viel Harz in die Poren des Schaums eindringen würde.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fertigung der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Sandwichstrukturen und die Durchführung des vorgestellten Vierpunkt-Biegeversuchs stellen einen hohen Zeit- und Kostenaufwand dar. Durch die Entwicklung des Strukturgenerators *Z88SandwichSIM* wurde ein voll automatisiertes *Preprocessing* basierend auf der *FEA*-Software *Z88Aurora* vorgestellt, dass die für den Biegeversuch notwendige *FE*-Geometrie inklusive der Randbedingungen erzeugt, berechnet sowie auswertet und darüber hinaus die Variation beliebiger struktureller Parameter zulässt. Diese Parametervariationen können in einem Batch-Modus vollkommen autonom durchgeführt werden.

Am Beispiel von in das Kernmaterial eingebrachter Harzstege wurde eine Parameterstudie durchgeführt, die je nach deren Orientierung und Anzahl einen positiven oder negativen Einfluss auf die Biegeeigenschaften des simulierten Prüfkörpers besitzen. Für die Variante *Saw Cut* wurde in dem oben behandelten Beispiel eine optimale massebezogene Biegesteifigkeit durch drei Versteifungsstrukturen in Breitenrichtung erreicht.

Untersuchungen der Ergebnisqualität von *Z88SandwichSIM* hinsichtlich der Vernetzungsgüte bzw. der Netzfeinheit bleiben abzuwarten. Die vorliegenden Tendenzen zur Verbesserung des Leichtbaupotentials sind jedoch nachvollziehbar und können als Ausgangspunkt für praktische Versuche, auch zur Validierung der Simulationsergebnisse, verwendet werden.

Literatur

- [1] Hau, E.: *Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Eigenschaften, Wirtschaftlichkeit*. 4. Auflage. Berlin: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-72151-2
- [2] Rudolph, F.; Neidnicht, M.; Rieg, F.: *Konzeption und Realisierung eines Strukturgenerators zur Generierung von Sandwichstrukturen mit Versteifungen für die Implementierung in der Finiten Elemente Analyse*. 11. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Aachen: Shaker-Verlag, 2013. ISBN: 978-3-8440-2182-0
- [3] Fathi, A.; Wolff-Fabris, F.; Altstädt, V.; Gätzi, R.: *An investigation on the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options*. *Journal of Sandwich Structures and Materials* 2013; 15(5): 487-508.
- [4] ASTM C393-00. *Standard test method for flexural properties of sandwich constructions*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000.
- [5] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure*. 4. Auflage. München, Wien: Carl-Hanser-Verlag, 2012. – ISBN: 978-3-446-42776-1
- [6] Wolf, J.: *C von A bis Z*. 2. Auflage. Bonn: Galileo Press, 2006. ISBN: 978-3-89842-643-5
- [7] Krause, A.: *Foundations of GTK+ Development*. New York: Springer-Verlag, 2007. ISBN: 978-1-59059-793-4
- [8] Warkus, M.: *Das GTK+/GNOME-Entwicklerhandbuch*. Heidelberg: dpunkt-Verlag, 2008. ISBN: 978-3-89864-512-6
- [9] Homepage: www.gnuplot.info. Aufgerufen: 15. September 2014