

Neue Ansätze zur Optimierung von Schalenstrukturen

Dieter Emmrich

Universität Karlsruhe, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau

Albert Albers

Universität Karlsruhe, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau

Kurzfassung

Schalenstrukturen, z.B. in der Form von Blechen, sind häufig Bestandteil von Hochleistungs- oder Leichtbauprodukten. Für minimales Gewicht oder höchste Steifigkeiten werden diese Strukturen häufig durch eine so genannte Versickung versteift. Je nach Komplexität der Beanspruchung der Schale ist es nicht einfach, ein gutes oder gar „ideales“ Sickenmuster ohne Hilfsmittel zu entwerfen. Ein Algorithmus zur automatischen Bestimmung von Form und Lage von Sicken ist hier wünschenswert. Das Problem mit mathematischen, auf Sensitivitäten basierenden Verfahren anzugehen ist möglich, führt aber durch das nichtlineare Verhalten und die Existenz vieler lokaler Minima zu vielen Schwierigkeiten. Ein weiterer, bisher kaum untersuchter Weg, ist die Bestimmung von Sickenmustern direkt anhand der Verteilung von Biegebeanspruchungen in der Komponente. Grundlage hierfür ist die Formulierung einer Biegespannungshypothese. Sie ist ein Maß dafür, wo und in welcher Höhe Biegeanteile in der Beanspruchung vorhanden sind und zeigt zusätzlich die Ausrichtung der auftretenden Biegung an. In einem nächsten Schritt kann auf Basis dieser Biegespannungshypothese ein Algorithmus entwickelt werden, der entsprechend gerichtet das Flächenträgheitsmoment der Schale erhöht und damit die auftretenden Biegungen im Bauteil verringert. Die vorliegende Arbeit zeigt einen Zwischenstand laufender Untersuchungen, die in diesem Bereich am Institut für Maschinenkonstruktionslehre der Universität Karlsruhe durchgeführt werden.

1 Einführung

Schalenstrukturen, z.B. in der Form von Blechen, sind häufig Bestandteil von Hochleistungs- oder Leichtbauprodukten. Für minimales Gewicht oder höchste Steifigkeiten werden diese Strukturen durch eine so genannte Versickung, d.h. durch Einbringung von Erhöhungen oder Vertiefungen senkrecht zur Oberfläche, versteift.

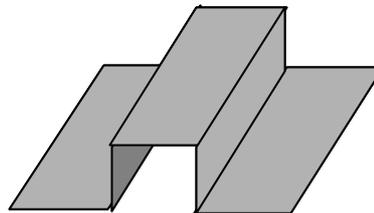


Abbildung 1: Prinzipdarstellung einer Sicke

Üblicherweise werden dabei Bleche mit mehreren Sicken versehen, man spricht hier von Sickenanordnungen [1], Sickenbildern [2] oder Sickenmustern.

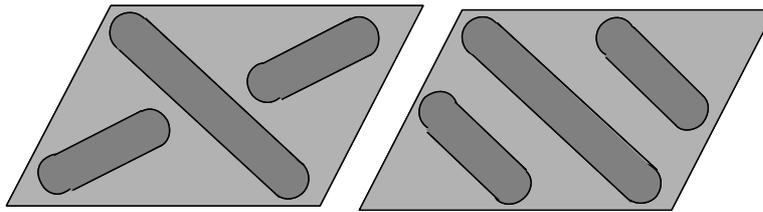


Abbildung 2: Sickenmuster

Mechanisch gesehen führen diese Sicken zu einer Erhöhung des Flächenträgheitsmomentes im Querschnitt der Schalenstruktur. Somit wirken Sicken hauptsächlich für Biegebeanspruchungen senkrecht zur Schale versteifend. Die Form des Sickenmusters hängt dabei stark von der auftretenden Belastung ab, aber auch von den Möglichkeiten des Fertigungsprozesses.

Je nach Komplexität der Beanspruchung der Schale ist es für den Konstrukteur nicht einfach, ein gutes oder gar „ideales“ Sickenmuster zu entwerfen. Es besteht sogar das Risiko, dass das gewählte Sickenmuster, ohne die Steifigkeit zu erhöhen, zu einer höheren Beanspruchung führt.

Für einfache Formen und Belastungen helfen bei der Gestaltung von Blechbauteilen oft Konstruktionskataloge und –richtlinien, wie z.B. in [3], weiter.

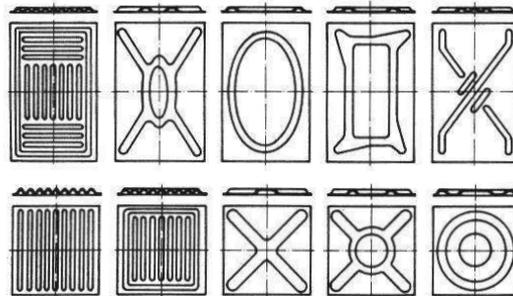


Abbildung 3: Gestaltungsbeispiele für Sickenmuster aus Konstruktionskatalogen [3]

Diese haben den Vorteil, dass hierbei schon die Fertigungsbedingungen aus dem Tiefziehprozess berücksichtigt wurden. Leider stammen die meisten Vorschläge aus den fünfziger Jahren und spiegeln entsprechend nicht die Weiterentwicklungen der Fertigungstechnik und die Möglichkeiten mit neuen, wesentlich leistungsfähigeren Tiefziehstählen wieder.

Aus diesem Grunde wurde von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) das Projekt „Bleche mit Sicken“ gestartet, welches im Jahr 2002 zu der Publikation eines Sickenatlasses führte. [2]

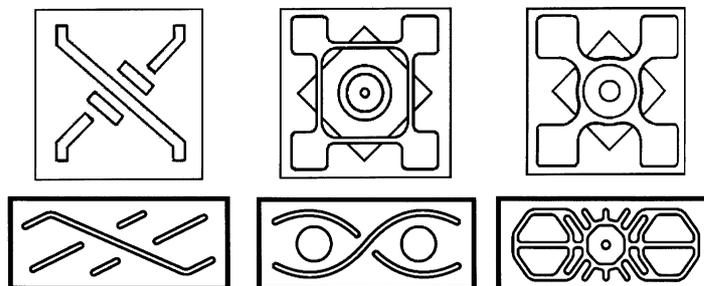


Abbildung 4: Gestaltungsbeispiele für Sickenmuster aus dem Sickenatlas [2]

Zum Entwurf dieser neuen Sickenmuster wurde der Topographieoptimierer Altair Optistruct eingesetzt. Die Ergebnisse wurden interpretiert und neu konstruiert. Eine nachfolgende Tiefziehsimulation stellte die Herstellbarkeit der Anordnungen sicher. Wenn die Herstellbarkeit nicht gegeben war, wurde das Sickenmuster entsprechend korrigiert.

Bei komplexeren Geometrien und komplexeren Beanspruchungen gibt es die Möglichkeit das Sickenmuster direkt mit Hilfe von Altair Optistruct zu entwerfen. Optistruct funktioniert dabei im Prinzip wie ein Formoptimierer mit Form Basis Vektoren. Die nötigen Form Basis Vektoren werden dabei entsprechend den gegebenen Parametern, wie z.B. Sickenhöhe und –breite, vollautomatisch von der Software erzeugt.

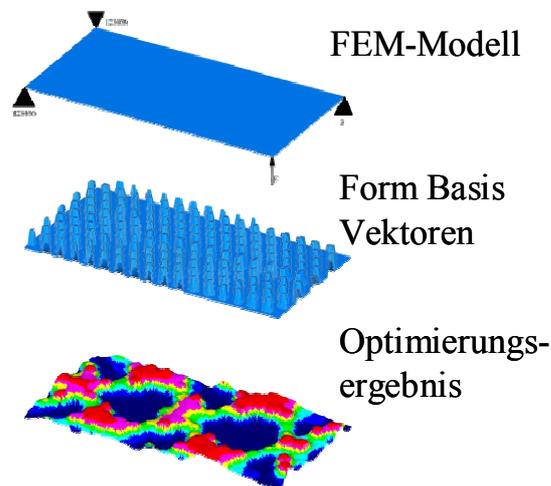


Abbildung 5: Ablaufprinzip einer Topographieoptimierung mit Altair Optistruct [4]

Das Problem mit mathematischen, auf Sensitivitäten basierenden Verfahren, wie diese, anzugehen führt u.a. zu folgenden Schwierigkeiten: Die Steifigkeit einer Schalenstruktur reagiert stark nichtlinear und sensibel auf die Einbringung von Sicken. Dadurch reagiert das System sehr stark auf Ungenauigkeiten, z.B. auf eine ungünstige Vernetzung der zugrunde liegenden FEM-Analyse. Zusätzlich weist das Problem zahlreiche lokale Minima auf, die zu einem vorzeitigen Ende der Suche führen.

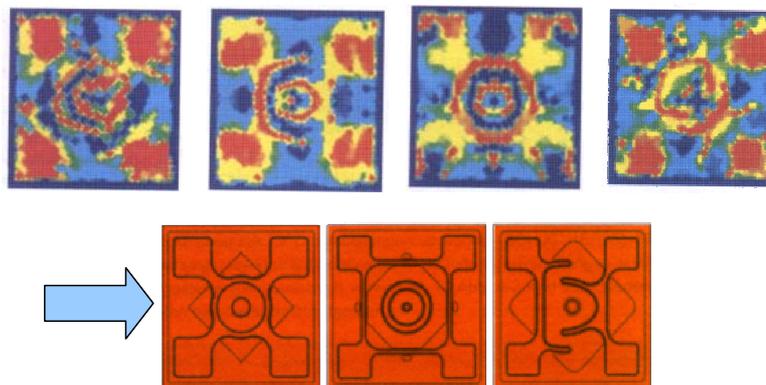


Abbildung 6: Optistruct Ergebnisse (oben) und mögliche Interpretationen (unten) [2]

Ein Indiz für lokale Minima sind z.B. unsymmetrische Optimierungsergebnisse für eine perfekt symmetrische Fragestellung, wie z.B. in Abbildung 6 zu sehen ist. Dies führt nicht nur zu suboptimalen Optimierungsergebnissen, sondern lässt auch großen Interpretationsspielraum bei der Konstruktion, was mit einem entsprechenden Risiko für eine weitere Designverschlechterung behaftet ist.

2 Theorie

2.1 Wirkungsweise von Sicken

Betrachtet man ein flaches Blech unter Biegung in Richtung seiner Blechnormalen, so wirkt das Blech durch seine geringe Höhe und damit seinem geringen Flächenträgheitsmoment sehr weich. Hinzu kommt, dass die Schwerelinie genau in der Blechmitte liegt. Dies führt dazu, dass die neutrale Faser der Biegung im Blechquerschnitt liegt und dadurch ein Teil des Materials nicht genutzt wird. (vgl.

Abbildung 7, oben). Wird nun eine Sicke eingebracht, wird auch das Material der neutralen Faser genommen und nun größtenteils komplett über den Querschnitt belastet. Das Flächenträgheitsmoment erhöht sich und die Biegesteifigkeit steigt entsprechend.

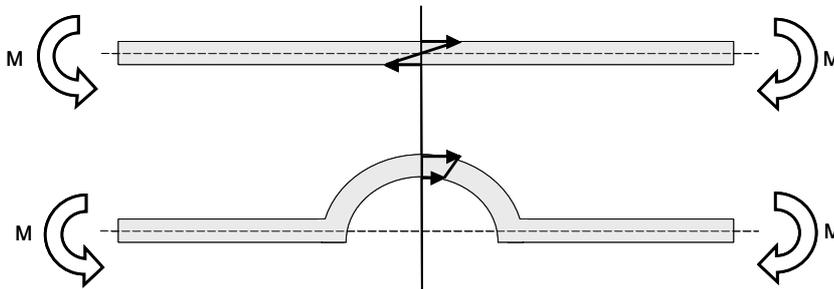


Abbildung 7: Wirkungsweise von Sicken

Erweitert man die Betrachtung auf einen 2D Biegezustand, wird man mit dem Problem konfrontiert, dass ein Punkt des Bleches über einen Blickwinkel von 360° unterschiedliche Biegebeanspruchungen erfahren kann. Daraus kann man ableiten, dass Sicken die größte Effizienz haben, wenn man sie in Richtung der maximalen Biegebeanspruchung ausrichtet.

2.2 Die Biegehypothese

Aus der Anforderung heraus, die Ausrichtung der maximalen Biegebeanspruchung eines Punktes zu finden, wurde am Institut eine Biegespannungshypothese formuliert. Mittels dieser Hypothese können deren Richtung sowie ihr Betrag in diese Richtung ermittelt werden.

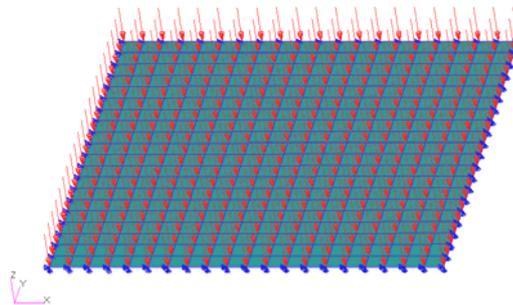


Abbildung 8: FEM-Modell einer flachen Platte unter Druck.

Dies soll am Beispiel einer flachen Platte unter Druck veranschaulicht werden (vgl. Abbildung 8). Wendet man für alle Knoten des FEM Modells die Biegehypothese auf den lokalen Spannungszustand an, ergeben sich folgende Biegevektoren:

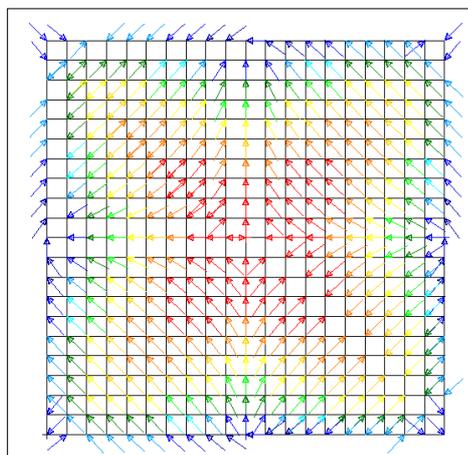


Abbildung 9: Biegevektoren für die Platte aus Abb. 8.

Die Farben repräsentieren dabei die Höhe der Biegebeanspruchung in der üblichen hot-cold Darstellung. An welchem Ende die Pfeilspitze liegt, ist für diese Betrachtung ohne Bedeutung.

2.3 Der Filterprozess

Diese Information soll nun genutzt werden, um ein Sickenmuster zu generieren. Dabei stellt sich die Frage nach dem idealen Versickungsgrad. Der Versickungsgrad setzt die versickten Flächen zu den unversickten Flächen ins Verhältnis.

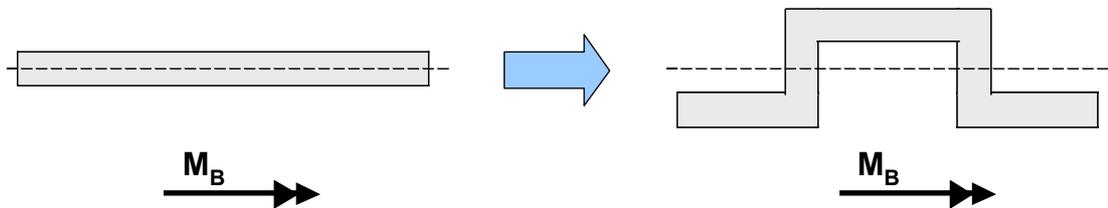


Abbildung 10: Einbringung einer Kastensicke

Sicken erhöhen Steinersche Anteile in Biegerichtung. Betrachtet man eine quer zur Biegerichtung geschnittene Sicke und deren Steinersche Anteile, kann man zwei Schlüsse ziehen:

- Die Steinerschen Anteile steigen mit Abstand zur Schwerelinie der Fläche, daher ist mechanisch eine „Kastensicke“ anzustreben.
- Das Flächenträgheitsmoment wird am größten, wenn die Schwerelinie des Bleches in der Mitte zwischen versickten und unversickten Bereichen liegt. Dies führt zu einem angestrebten Versickungsgrad von 50%.

Um dies zu erreichen, wurde am Institut ein Filter entwickelt, der sich entsprechend am Richtungsvektor ausrichtet und damit eine Sicke entlang der Biegetrajektorie erzeugt (siehe Abb. 11).

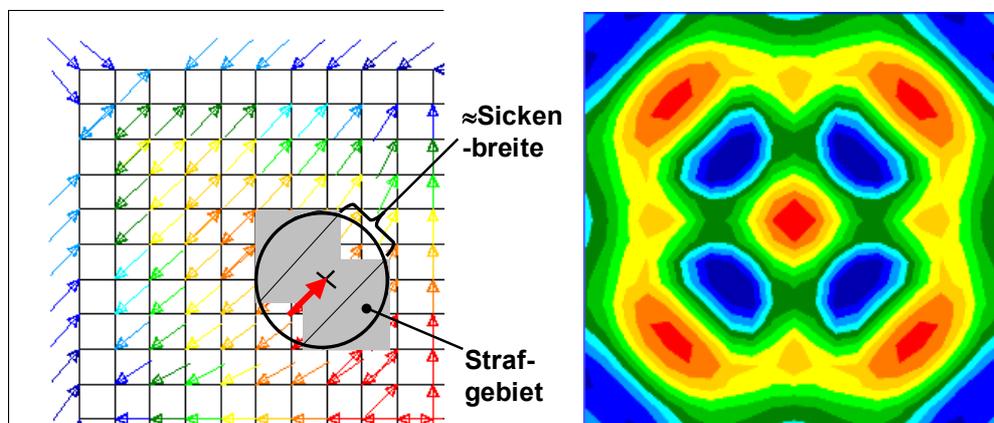


Abbildung 11: Filter zur Erzeugung der Sickenstruktur (links) und resultierendes Skalarfeld (rechts).

Durch die Filterung erhält man ein Skalarfeld, mit dem man eine Knotenverschiebung normal zur Oberfläche erzeugen kann. Mit dem neuen FEM-Modell kann man direkt das Sickenmuster untersuchen und evtl. durch erneute Anwendung des Gesamtprozesses Bereiche noch korrigieren.

Eine wie hier dargestellte Vorgehensweise hat folgende Vorteile:

- Sensitivitäten- und Solverunabhängig
- Netzunabhängig
- Schnell
- Klare Ergebnisse
- „Beliebige“ Einschränkung der Sickenform

Nachteile sind dabei die Einschränkung auf die Maximierung der Steifigkeit und dass das Verfahren nur auf Biegung reagiert. Letzteres macht jedoch Sinn, da die Erhöhung der Biegesteifigkeit die Hauptaufgabe von Sicken ist.

3 Beispiele

Um die Effizienz der vorgestellten Vorgehensweise zu untersuchen, wurden zwei Modelle aus dem bereits erwähnten FAT Sickenatlas nachgerechnet. Dies hat den Vorteil, dass die Modelle bereits unabhängig optimiert und konstruktiv gedeutet sind, und dass die erreichten mechanischen Eigenschaften gut dokumentiert sind.

3.1 Die quadratische Platte

Das erstellte Modell entspricht dem quadratischen Blech des FAT Sickenatlas mit einer Besonderheit: Es wurde ein unregelmäßiges Netz verwendet. Da bei symmetrischen Optimierungsproblemen auch die Lösung symmetrisch sein muss, würde bei einer Netzabhängigkeit des Verfahrens dies sofort mit einer Unsymmetrie der Lösung sichtbar werden.

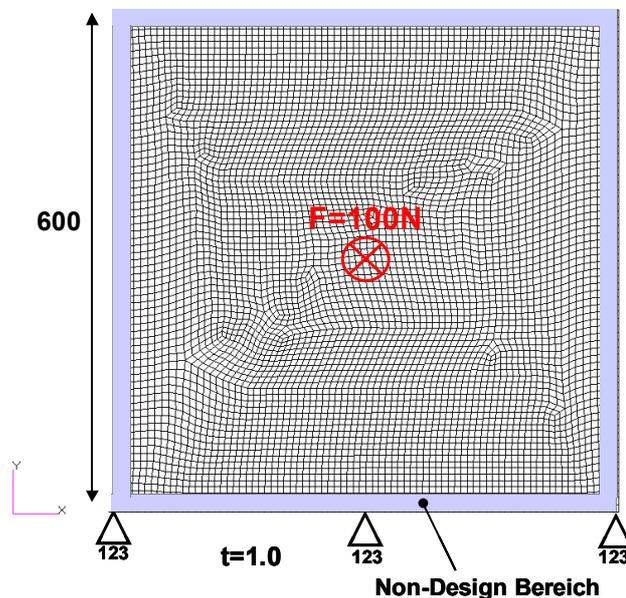


Abbildung 12: FEM-Modell der quadratischen Platte des Sickenatlas

Ziel der Optimierung war die Maximierung der Bodensteifigkeit bei zentrischer Kraft und einer Sickenhöhe von 20mm.

Die Berechnung wurde mit zwei verschiedenen Sickenbreiten durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

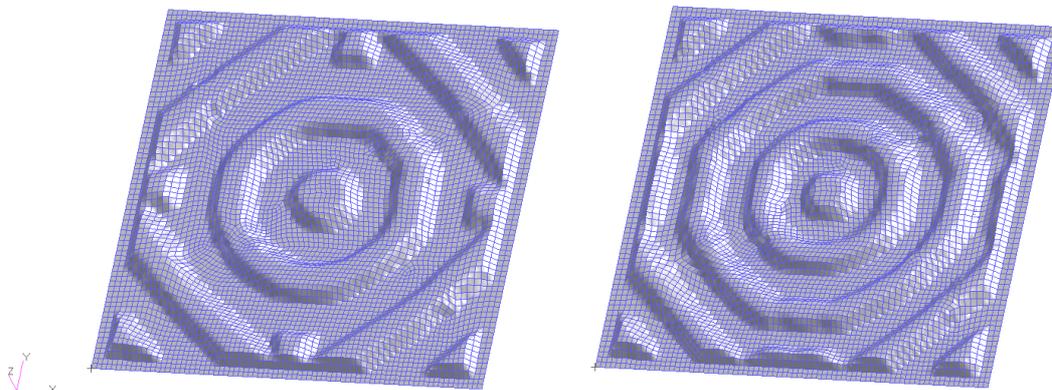


Abbildung 13: Ergebnisse der Optimierung, links mit Sickenbreite 80mm, rechts mit 60mm.

Die Ergebnisse weisen praktisch keine Netzabhängigkeit auf, was für die Stabilität des Verfahrens spricht. Die Netzqualität ist sehr gut, Elementverzerrungen halten sich im Rahmen. Dies wird u.a. durch eine Netzglättung nach jeder Iteration erreicht. Dies ist möglich, da das Verfahren gradientenfrei arbeitet und daher gegen Netzkorrekturen unempfindlich ist. Um die Rechengenauigkeit zusätzlich zu erhöhen, stellt der Algorithmus sicher, dass über die Sickenhöhe mindestens 2 Elementkanten vorhanden sind. Für eine Optimierung werden üblicherweise 5 Iterationen oder weniger benötigt.

Abbildung 14 stellt die mechanischen Eigenschaften eines Sickenmusters aus einem Konstruktionskatalog [3] (Literatur), zweier Muster aus dem Sickenatlas (optimiert) und den mkl-Lösungen gegenüber.

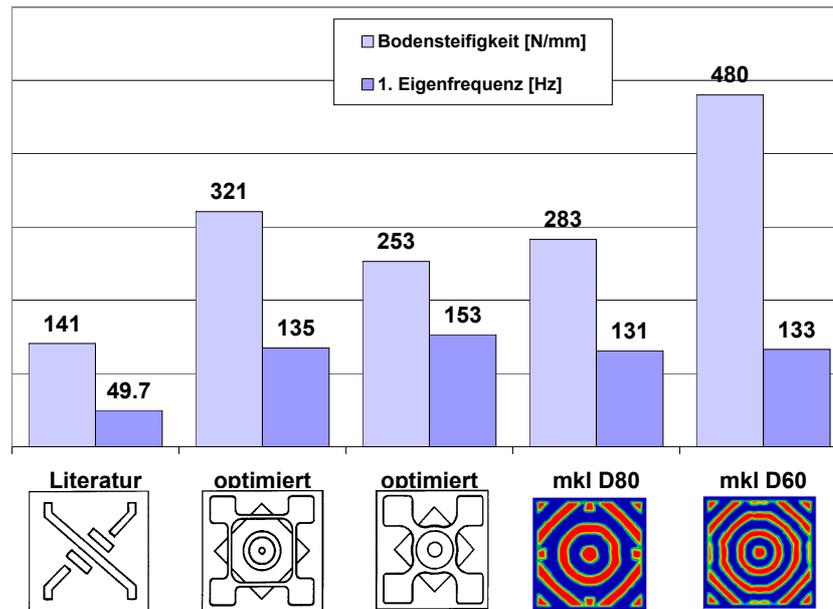


Abbildung 14: Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Sickenmuster

Da die mkl-Sickenmuster nicht wie die anderen nachkonstruiert und neu vernetzt wurden, soll hier nur festgestellt werden, dass die Ergebnisse des neuen Ansatzes in den gleichen Steifigkeitsbereichen liegen, wie die des Sickenatlasses. Im Aussehen unterscheiden sie sich jedoch deutlich. Dies legt die Vermutung nahe, dass es eine große Klasse an Sickenmustern mit vergleichbaren Eigenschaften gibt. Die Tendenz, dass schmalere Sicken zu einer höheren Steifigkeit führen, erscheint logisch, da hiermit genauer auf die lokalen Biegerichtungen eingegangen werden kann.

3.2 Die rechteckige Platte

Als weiteres Beispiel wurde eine rechteckige Platte aus dem Sickenatlas gewählt.

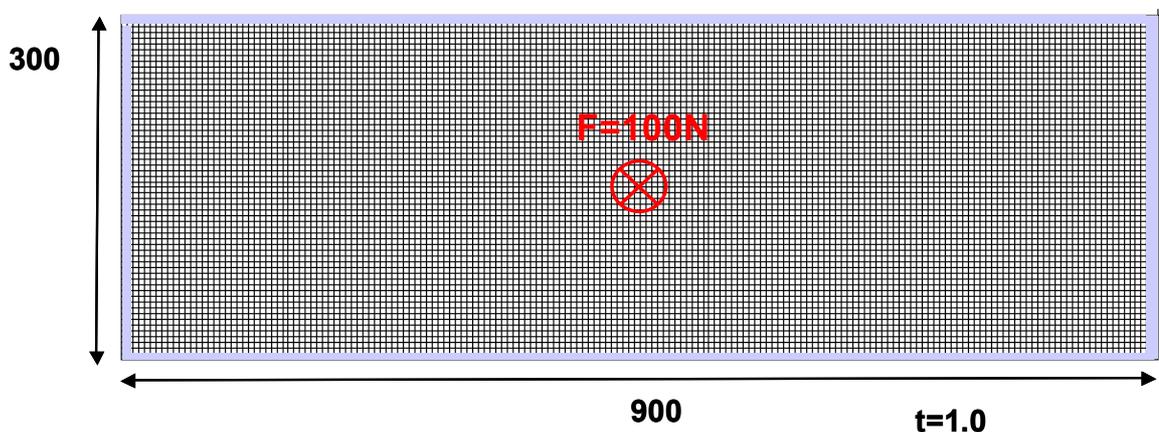


Abbildung 15: FEM-Modell der rechteckigen Platte des Sickenatlas

Die Belastung erfolgte wieder zentrisch und wieder war das Ziel die Maximierung der Bodensteifigkeit, diesmal bei einer Sickenhöhe von 10mm.

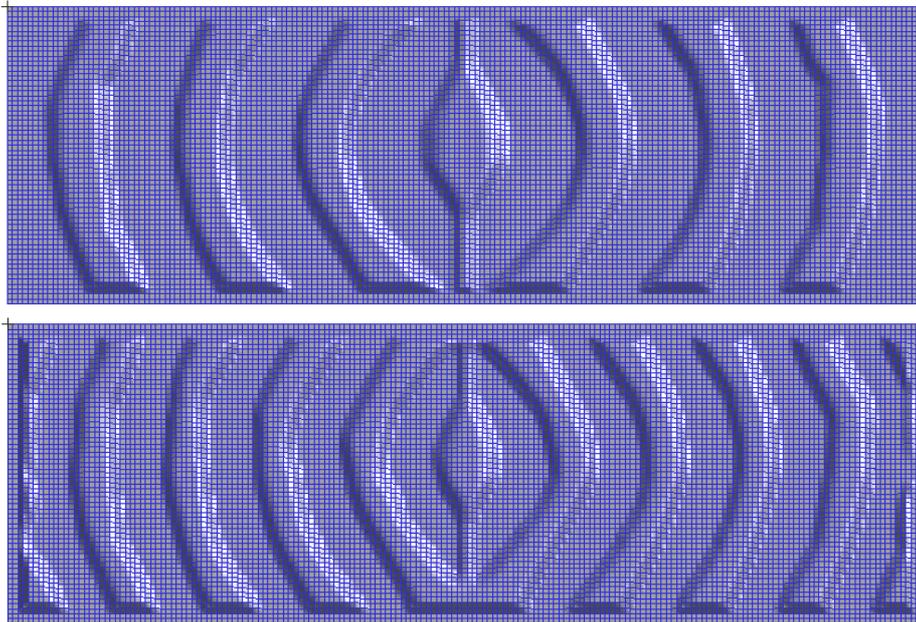


Abbildung 16: Ergebnisse der Optimierung, oben mit Sickenbreite 80mm, unten mit 60mm.

In Abbildung 16 sind die Ergebnisse aus der Optimierung mit dem mkl-Ansatz zu sehen. Diese Ergebnisse wurden wieder mit bisher bekannten Sickenmustern verglichen:

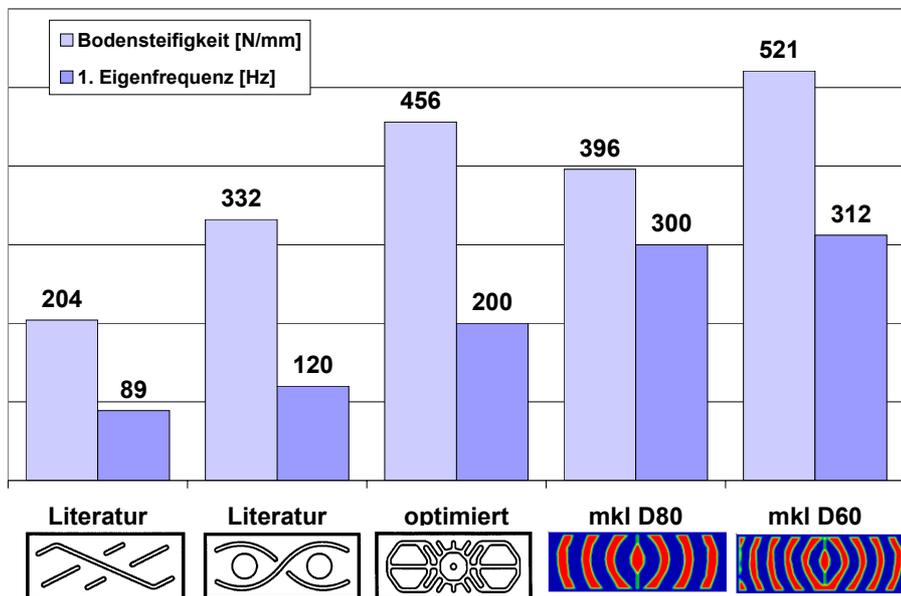


Abbildung 17: Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Sickenmuster

Wieder zeigt sich, dass die neuen Sickenmuster zu den optimierten Mustern des Sickenatlasses (es wurde eines exemplarisch gewählt) qualitativ zumindest gleichwertig ist. Dabei sind die entstandenen Sickenformen deutlich einfacher. Die Sickenmuster aus der konventionellen Literatur liegen wie beim vorherigen Beispiel deutlich zurück.

4 Fazit

Auf Basis der Betrachtung der mechanischen Wirkungsweisen von Sicken wurden Hypothesen formuliert, denen ein ideales Sickenmuster entsprechen muss:

- Sicken müssen in Richtung der größten Biegebeanspruchung ausgerichtet werden.
- Der Versickungsgrad einer versickten Fläche sollte idealerweise bei 50% liegen.

Davon ausgehend wurde ein Algorithmus basierend auf Biegevektoren entwickelt, der ein Sickenmuster generiert welches diesen Hypothesen genügt.

An zwei Modellen aus dem FAT Sickenatlas wurde gezeigt, dass die so erzeugten Sickenbilder Sicken aus konventionellen Konstruktionskatalogen überlegen sind und ähnliche mechanische Eigenschaften, wie die optimierten Sickenbilder des Atlases haben.

Der Algorithmus zeigte sich robust und netzunabhängig. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Unabhängigkeit von Sensitivitäten, womit es solverunabhängig eingesetzt werden kann. Darüber arbeitet das Verfahren mit wenigen Iterationen und die Ausgabe der Biegevektoren fördert das mechanische Verständnis des Konstrukteurs für sein Bauteil.

Da das Verfahren sehr neu ist, befindet es sich im Moment noch in einer umfangreichen Testphase. Eine erste kommerzielle Umsetzung findet sich bereits in der Beta-Version von Tosca 5.0 der Firma FE-Design¹.

Literatur

- [1] Michael Widmann: „Herstellung und Versteifungswirkung von geschlossenen Halbrundsicken“, Berichte aus dem IFU Stuttgart, Springer Verlag, 1984.
- [2] Dominik Schwarz: „Auslegung von Blechen mit Sicken (Sickenatlas)“, FAT Schriftenreihe Nr. 168, 2002.
- [3] Gerhard Oehler, Anton Weber: „Steife Blech- und Kunststoffkonstruktion“, Konstruktionsbücher Band 30, Springer Verlag, 1972.
- [4] Altair Hyperworks V. 5.0: Optistruct Hilfe Datei.

¹ Siehe www.fe-design.de

