

# SIMULATION DES AUFSTELLVORGANGS VON FALTKERNEN

F. Muhs, S. Fischer, P. Middendorf

Universität Stuttgart, IFB Institut für Flugzeugbau, 70569 Stuttgart, Deutschland

## Zusammenfassung

Faltkerne für Sandwichbauteile werden durch eine Faltung einer ebenen Struktur in ein räumliches Gebilde überführt, welches sich durch eine geringe Dichte sowie eine offene Kernstruktur auszeichnet. Durch den Aufstellvorgang der Faltkerne werden Imperfektionen in die Geometrie eingebracht, welche die Steifigkeit des Faltkerns negativ beeinflussen.

Das Ziel ist es diesen Aufstellvorgang zu simulieren und so eine rein numerische Aussage über die Steifigkeit des Sandwichkerns zu treffen, unabhängig von Messungen an realen Kernen oder zufällig eingebrachten Imperfektionen, wie es bei aktuellen Simulationen der Fall ist. Durch das Aufstellen bilden sich, analog zum realen Prozess, Imperfektionen in den Kernen, welche nicht nachträglich in die bereits aufgestellte Geometrie eingebracht werden müssen. In simulierten Normversuchen werden die numerisch aufgestellten Kerne mit optisch vermessenen Waben und Versuchswerten verglichen.

## 1. EINFÜHRUNG

Im Flugzeugbau spielen, neben den Faserverbundwerkstoffen, auch die Sandwichverbunde aufgrund ihres hohen Leichtbaupotenzials bei steifigkeitskritischen Anwendungen eine immer größere Rolle. So finden sie bereits großflächig Anwendung bei der Herstellung von Hubschrauberzellen, in Klappenstrukturen sowie bei Innenausstattungs- und Verkleidungsteilen.

Ein großes Potenzial bieten neu entwickelte Faltwabenkerne aus Aluminium, Kunststoff oder Faserverbundmaterial. Durch Falten einer ebenen Struktur wird ein räumliches Gebilde erzeugt, welches sich durch eine geringe Dichte sowie eine offene Kernstruktur auszeichnet. Die Geometrie der Faltkerne kann auf den jeweiligen Lastfall sowie die Endkontur gezielt angepasst und optimiert werden [1, 2].

Während des Aufstellens der Waben stellen sich Abweichungen von der idealen Geometrie ein, welche als Imperfektionen bezeichnet werden. Geometrisch zeigt sich dies in gekrümmten Wabenflächen, dem nicht linearen Verlauf der Faltkanten und dem Faltwinkel in den Kanten. Ursache für diese Fehler sind Ungenauigkeiten bei der Prägung der Kanten, sowie Unregelmäßigkeiten in Stärke und Eigenschaften des Materials. Diese Verformungen resultieren in einer geringeren Steifigkeit und Festigkeit der realen Sandwichstruktur. Um die Tragfähigkeit des Sandwichs vorauszusagen, müssen diese Imperfektionen erfasst und berücksichtigt werden. In der Literatur findet man verschiedene Ansätze zur Realisierung.

Eine Möglichkeit die geometrischen Imperfektionen zu berücksichtigen ist das optische Vermessen einer aufgestellten Zellgeometrie. Die exakte Geometrie mit allen Imperfektionen kann hier in ein FEM-Modell überführt werden. Dieses Verfahren bietet eine sehr genaue Erfassung der Imperfektionen, beinhaltet

jedoch auch einen großen Zeitaufwand. Zusätzlich müssen für jeden Scan-Vorgang Proben gefertigt werden, was einen weiteren Nachteil gegenüber der numerischen Auslegung darstellt [3]. Als weitere Möglichkeit die Imperfektionen zu berücksichtigen kann das ideal aufgestellte Modell des Faltkerns manipuliert werden. Um globale Imperfektionen darzustellen, wird die Geometrie in einem vorgegebenen Rahmen zufällig variiert. Lokal begrenzte Imperfektionen kann man durch eine zufällige Verschiebung der Knoten, sogenanntes „node-shaking“, im betreffenden Bereich realisieren. Die vorgegebene Amplitude bei der Verschiebung ist dabei ein Annahmewert, welcher immer mit einer Unsicherheit verbunden ist. Infolgedessen stimmen die Ergebnisse, in Abhängigkeit der Geometrie, nur bedingt mit den Versuchswerten überein [4, 5]. Eine Abweichung von der idealen Geometrie kann auch durch Krümmen der Faltwabenflächen erzeugt werden. Bei dieser Methode werden die zuvor ermittelten Beulmoden mit dem Netz des idealen Modells superponiert und mindern so die Tragfähigkeit des Faltkerns ab [5, 6].

Um Fehler innerhalb des Materials zu berücksichtigen, werden die Werkstoffkennwerte lokal oder global reduziert. Innerhalb eines vorgegebenen Grenzbereichs erfolgt die Reduktion zufallsbedingt. Die Vorgabe der unteren Grenze bei der Verminderung der Materialkennwerte basiert auch hier auf Erfahrungswerten und unterliegt somit unter Umständen einer willkürlichen Annahme. Im Vergleich zu den übrigen Ansätzen ist dieses Verfahren am effektivsten [2, 3].

Hier soll ein weiterer Weg zur Erfassung der Imperfektionen untersucht werden. Dabei ist es das Ziel den Faltkern rein numerisch auszulegen, da gegenüber dem optischen Vermessen ein enormer Zeitvorteil entsteht. Ebenfalls soll auf Annahmewerte verzichtet werden, um Unsicherheiten, zu vermeiden,

sowie ein rein physikalisch basiertes Vorgehen sicherzustellen.

Dazu werden Faltkerngeometrien im ungefalteten Zustand modelliert und in einer Finiten Elemente Methode (FEM) Simulation zu Kernen aufgestellt. Die Ergebnisse werden anschließend mit den idealen Faltkernen sowie Geometriedaten aus einem 3D-Scan-Verfahren und Versuchswerten verglichen. Um darüber hinaus einen Vergleich in Bezug auf die Steifigkeit der Faltkerne zu erhalten, werden Modelle für Druck-, Längsschub- und Querschubversuche aus den aufgestellten Kernen, sowie mit idealen Geometrien erstellt. Das Steifigkeitsverhältnis der aufgestellten Kerne zu den idealen Geometrien wird anschließend mit dem Verhältnis der abgescannten Faltkerne zu den idealen Geometrien verglichen.

## 2. AUFSTELLSIMULATION

### 2.1. Geometrie

Die Simulation des Aufstellvorgangs wird mit drei unterschiedlichen Geometrien durchgeführt. Jede Faltwabengeometrie besitzt zusätzlich einen eigenen Werkstoff, um bei der Simulation ein möglichst breites Spektrum abzudecken. Die Form der Reinaluminium (Alu 182) - und Aramidwaben (N637) wird als 2-HAP Geometrie oder auch als Zickzack bezeichnet. Für die Geometrie der PEEK (PEEK 1000) Waben wird die Bezeichnung 3-HAP benutzt, wobei die Zahl jeweils die Anzahl der Hauptfaltachsen angibt.

Die exakte Modellierung der Faltkanten ist besonders wichtig, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Imperfektionen haben. Die Kanten der einzelnen Faltkerne und Materialien unterscheiden sich, aufgrund des Herstellungsprozesses und des Materialverhaltens, dabei in ihrer geometrischen Form voneinander. Die Faltkanten der Kerne aus Reinaluminium weisen durch die Prägung eine sehr starke plastische Verformung auf. Um die geometrischen Abmaße der Kante zu erfassen, wurden Vergrößerungen sowie Schlibfbilder angefertigt und vermessen. Infolgedessen wird die Faltkante des Alu 182 durch eine dreieckige Querschnittsform modelliert. Für die Waben aus PEEK 1000 und das N637 stellt sich keine plastische Verformung ein. Aus diesem Grund wird die Faltkante als ebene Fläche mit verringerter Wandstärke modelliert.

Bezeichnung	Wandstärke Wabenfläche [mm]	Wandstärke Faltkante [mm]
Alu 182	0,1	0,07
PEEK 1000	0,277	0,02
N637	0,3	0,175

TAB 1. Wandstärken der Faltkerne

Im Rahmen einer Parameterstudie kann gezeigt werden das der Kantenverlauf sowie der Auslauf des Werkzeugs bei geringen Schwankungen (<5%) keinen Einfluss auf den Aufstellvorgang hat.

### 2.2. Vernetzung

Bei den Faltwaben handelt es sich um dünnwandige Strukturen. Die Materialdicke ist im Vergleich zu der Ausdehnung der Wabenflächen klein, sodass die Wabenfläche mit den Methoden der Schalentheorie behandelt werden kann. Unter Berücksichtigung dieses Aspekts wird die Faltwabengeometrie mit zweidimensionalen, konventionellen Schalenelementen vernetzt. Innerhalb der Gruppe der Schalenelemente werden rechteckige, reduzierte Elemente mit linearer Ansatzfunktion verwendet.

Unabhängig von der Geometrie und des Werkstoffs werden über die Faltkantenbreite jeweils 4 Elemente mit einer Größe von 0.1mm gewählt, um eine ausreichend feine Auflösung zu erzielen. Auf den Flächen der Faltwabe werden 0.3mm große Elemente verwendet um die Simulationszeit zu reduzieren.

### 2.3. Material

In der Aufstellsimulation werden drei verschiedene Werkstoffe untersucht. Dabei handelt es sich um Reinaluminium, den thermoplastischen Kunststoff PEEK sowie Aramidpapier.

Aluminium und PEEK sind isotrope Materialien und werden sowohl in ihrem linear-elastischen als auch im plastischen Materialverhalten abgebildet. Der Materialbereich der plastischen Verformung wird durch abschnittsweise, lineare Funktionen dargestellt, deren Stützpunkte sich jeweils aus einer plastischen Dehnung  $\epsilon_p$  sowie einer zugehörigen Spannung  $R_p$  zusammensetzen. Für das Alu 182 werden zwei, für PEEK 1000 ein linearer Abschnitt definiert.

Das Aramidpapier besteht aus einem Verbund von Kurzfasern aus Aramid und einer Matrix aus Phenolharz. Infolgedessen besitzt dieses Material ein anisotropes Verhalten. Dieses wird durch ein Materialmodell abgebildet, welches auf dem Ramberg-Osgood Gesetz aufbaut und durch eine Subroutine in den Solver integriert wird. In der Verarbeitung stellt das Aramidpapier einen Sonderfall dar. Während des Aufstellvorgangs befindet sich das Phenolharz im sogenannten B-Zustand. Innerhalb dieses Bereichs wird das Phenolharz auch als Resitol bezeichnet und besitzt eine Konsistenz von nahezu flüssig bis hin zu einer gummiartigen, zähen Masse. Erst nach dem Aufstellvorgang härtet das Harz (Resit), vollständig aus und erhält seine volle Steifigkeit. In Abhängigkeit vom Grad der Aushärtung nimmt der E-Modul des Aramidpapiers zu. Um diesen Effekt zu berücksichtigen werden die Materialdaten, welche sich auf den ausgehärteten Zustand beziehen, reduziert. Der E-Modul der Faserlage wird ebenfalls abgemindert, da diese aufgrund der Faserarchitektur (Wirrfaser) eine geringe Steifigkeit.

Das Verhalten der Kerne unmittelbar nach dem Aufstellen wird ebenfalls maßgeblich vom verwendeten Material bestimmt. Bei den Faltkernen aus Reinaluminium und PEEK bilden sich während des Aufstellens, aufgrund der Steifigkeit, Spannungen im Mate-

rial aus. Diese Eigenspannungen können durch eine Wärmebehandlung unmittelbar nach dem Aufstellen abgebaut werden. Die Faltkerne des Reinaluminiums werden sowohl in einer wärmebehandelten Variante als auch ohne Nachbehandlung verbaut. Erfolgt keine Entspannung des Materials durch Wärme, verformt sich die Wabe durch die Eigenspannungen unmittelbar nach dem Aufstellen. Dieser Vorgang wird auch als „spring-back“ bezeichnet und kann unter Umständen große Verformungen nach sich ziehen. In der Aufstellsimulation werden beide Versionen des Alu 182 untersucht. Dem Aufstellvorgang von PEEK 1000 wird in jedem Fall eine Wärmebehandlung nachgeschaltet, da andernfalls der Kern seine Form nicht behalten würde. Beim Falten von Aramidpapier sind hingegen solche Eigenspannungen zu vernachlässigen, da sich das Material im B-Zustand befindet und nur eine geringe Steifigkeit besitzt.

## 2.4. Lagerung und Lastfall

Die gelagerten Faltkanten, können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die Unterkanten sind im Sandwich mit der unteren Deckschicht verklebt. Die Ebene dieser Deckschicht fällt in der Modellierung mit der XY-Ebene zusammen, in welcher auch die ungefaltete Geometrie liegt. Die Oberkanten sind im späteren Sandwichverbund mit der oberen Deckschicht verklebt und müssen folglich um die aufgestellte Höhe  $h$  in Z-Richtung verschoben werden. Die Verschiebung wird über die Knoten der oberen Kanten aufgebracht. Hierbei ist zu beachten, dass nur der Freiheitsgrad in Z-Richtung vorgegeben werden darf. Die übrigen Freiheitsgrade müssen frei sein, da andernfalls das Aufstellen gehemmt würde. Die Knotenbewegungen der unteren Kanten werden in Z-Richtung gesperrt, sodass diese in der XY-Ebene verbleiben. Durch zusätzliche Lager werden die Starrkörperbewegungen des Modells unterbunden.

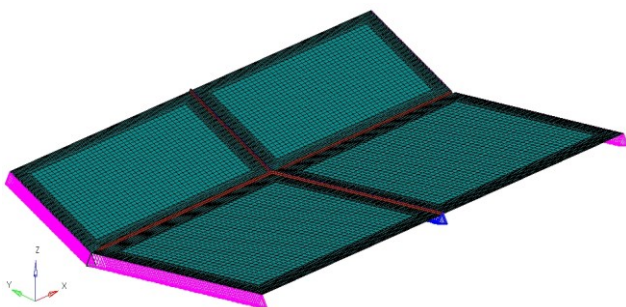


BILD 1. Lagerung Aufstellvorgang

Eine Ausnahme im Hinblick auf die Lagerung bilden die Waben des Alu 182 bei denen keine Wärmebehandlung nach dem Aufstellvorgang erfolgt. In einem zweiten Lastfall, welcher sich an den Aufstellvorgang anschließt, werden nur die Starrkörperbewegungen unterbunden. Infolgedessen kann der „spring-back“, welcher aus den Eigenspannungen resultiert, nume-

risch erfasst werden.

Die Kerne aus PEEK1000 sowie N637 müssen, im Gegensatz zum Alu182, in einer expliziten Simulation aufgestellt werden. Eine Aufstellgeschwindigkeit von 1000-2500mm/s ist, in Abhängigkeit der Modellgröße, praktikabel. Des Weiteren wurde in den ersten 25% der Simulationszeit ein linearer Geschwindigkeitszuwachs gewählt, um Trägheitseffekte in der Beschleunigung zu vermeiden.

Aufgrund von Konvergenzproblemen mit dem N637, wird für dieses Material ein weiterer Ansatz gewählt. Der Aufstellvorgang erfolgt über zwei Matrizen, welche zu Beginn ebenfalls in der Ebene liegen. Zwischen diesen Matrizen befindet sich die Faltwabe, welche über einen Reibungskontakt zwischen den Matrizen gelagert ist. Als Reibungsbeiwert wird ein Wert von 0.35 für den Kontakt zwischen Aramidpapier und Kunststoff angenommen. Die beiden Matrizen werden über Lagerbedingungen, analog zur ersten Modellierung aufgestellt. Die Faltwabe selbst ist frei von Lagern und wird lediglich durch die Kontaktformulierung zwischen den beiden Matrizen gehalten.

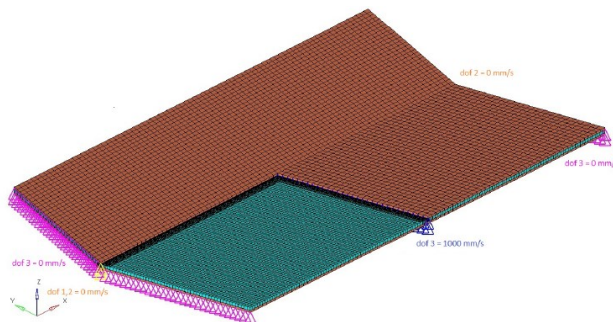


BILD 2. Faltwabe (Grün) zwischen Matrizen (Braun)

Alle Aufstellvorgänge müssen in einer nicht-linearen Simulation realisiert werden. Aufgrund der großen Verformungen von bis zu 20mm kann das lineare Verformungsgesetz nicht mehr angewendet werden.

## 3. ERGEBNISSE DER AUSTELLSIMULATION

### 3.1. Ergebnisse Alu 182

Bedingt durch das isotrope Werkstoffverhalten sowie die geringe Aufstellhöhe von 12mm im Vergleich zu PEEK 1000 und dem N637 können mit den Alu Waben in kurzer Zeit aufgestellte Kerne erzeugt werden. Der Einfluss des Aufstellens zeigt sich deutlich, sodass die Waben in einem ersten Schritt optisch mit den gescannten und idealen Waben verglichen werden. Im Vergleich zu den idealen Zellen zeigen sich deutliche Imperfektionen. Gegenüber den gescannten Kernen können jedoch Unterschiede bei der Ausbeulung der Flächen sowie an den Randbereich festgestellt werden. Insbesondere ist der Unterschied zwischen Einheitszellen und Mehrzellenmodellen zu beachten, da bei größeren Modellen ein zusätzlicher Stützeffekt benachbarter Zellen zu be-

obachten ist. Dieser Effekt kann auch numerisch gut nachgebildet werden. Um den Einfluss der Modellgröße weiter zu untersuchen, werden Einheitszellenmodelle mit periodischen Randbedingungen erzeugt. Auch hier kann eine Reduktion der Imperfektionen beobachtet werden.

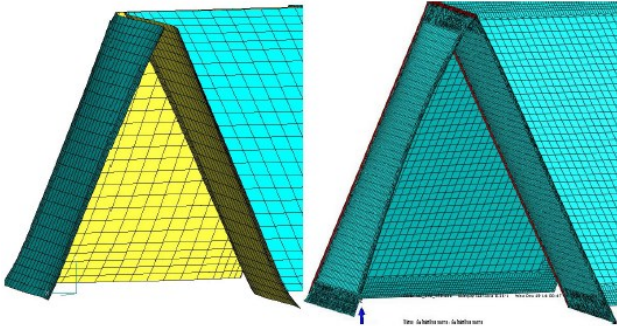


BILD 3. Alu 182 Geometrie, links abgescannnt, rechts numerisch

Als weiterer Einflussfaktor kann die Wandstärke der Faltkanten und die daraus resultierende Steifigkeit der Kanten identifiziert werden. Abweichungen der Wandstärke im Mikrometer-Bereich können bereits zu unbrauchbaren Geometrien und Konvergenzproblemen führen. Dies bestätigt die Vermutung, dass besonders die Faltkanten Einfluss auf die Imperfektionen der Faltwabe haben.

Für die Alu 182 Waben ohne thermische Behandlung können identische Effekte beobachtet werden. Bei diesem Wabentyp ist besonders die zusätzliche Verformung durch den „spring-back“ zu berücksichtigen, welcher bei der geometrischen Auslegung eine Rolle spielt, da sich die Kernhöhe verringert.

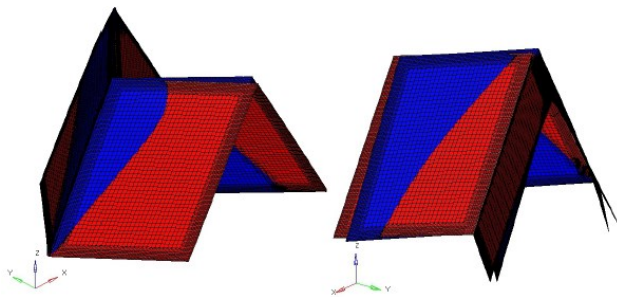


BILD 4. Wärmebehandelte Wabe (Rot) und unbehandelte Wabe (Blau)

### 3.2. Ergebnisse PEEK 1000

Vergleicht man die optisch vermessenen Waben und die numerisch aufgestellten Kerne, so ist der ähnliche Verlauf der Kanten zu erkennen. Auch die geometrische Gestalt der Kanten, welche eine starke Rundung aufweisen, ist in beiden Modellen identisch.

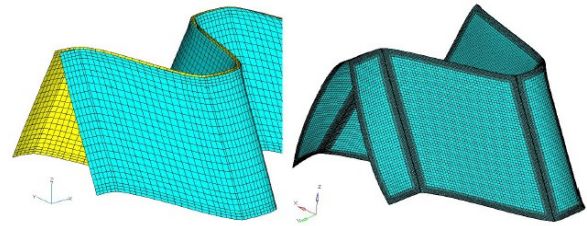


BILD 5. Wabe PEEK 1000, links abgescannnt, rechts numerisch

Bei der numerisch aufgestellten Variante stellen sich starke Deformationen an den freien Kernenden ein, welche bei den gescannt Waben nicht zu beobachten sind. In Bezug auf die Imperfektionen ist somit der gleiche Effekt zu beobachten, wie beim Alu 182. Mit zunehmender Modellgröße nehmen die Deformationen der inneren Zellen bedingt durch einen Stützeffekt ab. Die Qualität des aufgestellten Kerns ist maßgeblich von der Modellgröße abhängig.

### 3.3. Ergebnisse N637

Mit einer aufgestellten Kernhöhe von 20mm und einem Faserverbundmaterial stellen die N637 Waben in der Simulation den kritischsten Fall dar. Durch den Übergang auf eine explizite Analyse sowie zusätzlicher Lager entlang der Symmetriefaltkante können auftretende Instabilitäten unterbunden werden. Eine Simulation mit Mehrzellenmodellen kann aufgrund des zunehmenden Rechenaufwandes nicht realisiert werden.

Durch die zusätzlichen Lager auf der mittleren Kante kommt es zu lokalen Deformationen in der Faltkante. Die Auswirkung dieser Deformationen auf die gesamte Geometrie zeigt sich in einer Abweichungen der Krümmungen an den Wabenflächen im Vergleich zu den abgescannnten Kernen. Besonders im oberen Bereich der Wabenfläche ist eine stärkere Krümmung bei den numerisch aufgestellten Kernen zu erkennen.

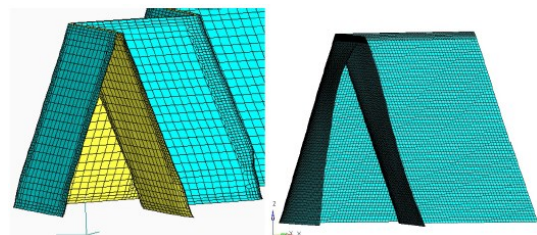


BILD 6. Wabe N637, links abgescannnt, rechts numerisch

Bei der Durchführung des zweiten Modellierungsansatzes für das N637 (Aufstellen über Matrizen) treten für die verwendeten Shell Elemente solverspezifische Probleme auf. Der Übergang auf Continuum Shell Elemente zeigt eine Verbesserung des Konvergenzverhaltens. Verwendbare Ergebnisse können jedoch auch mit diesen Elementen nicht erzielt werden, da es zu einer Wellenbildung der Faltwabe zwischen den Matrizen kommt.

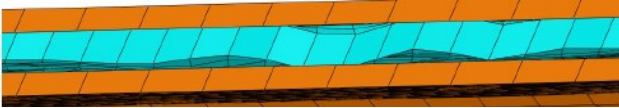


BILD 7. Wellenbildung N637 Wabe

## 4. MODELLBILDUNG DER STRUKTURSIMULATION

### 4.1. Geometrie

Die Geometrie der Faltkerne für die Steifigkeitssimulationen ergibt sich direkt aus den aufgestellten Waben. Zusätzlich werden Geometrien für ideale Kerne erzeugt. Die Wandstärken der Wabenflächen und der Faltkanten wird analog zu den numerisch aufgestellten Kernen gewählt. Es wird angenommen, dass die Faltkanten in einem perfekten Winkel aufeinander treffen. Der Auslauf des Prägwerkzeugs an den Rändern wird ebenfalls nicht modelliert.

### 4.2. Vernetzung

Um die aufgestellten Kerne in einer Struktursimulation vergleichen zu können, ist es nötig die Geometrie bzw. die Elemente nach dem Aufstellvorgang zu isolieren und für neue Lastfälle zu bearbeiten. Bei der Modellerstellung der Kerne aus wärmebehandeltem Alu 182, PEEK 1000 und N637 werden keine Spannungen aus dem vorangegangenen Aufstellvorgang übernommen. Diese Annahme ist legitim, wenn man davon ausgeht, dass durch die Wärmebehandlung des Alu 182 und des PEEKs die Eigenspannungen im Material komplett abgebaut werden. Für N637 ist der Ansatz ebenfalls korrekt, da die Aushärtung des Phenolharzes erst im aufgestellten Zustand erfolgt und die Wabe während des Aufstellvorgangs somit vernachlässigbare Eigenspannungen aufbaut.

Um das deformierte Netz des Aufstellvorgangs ohne Spannungsinformationen zu erhalten, ist ein Skript erstellt worden, welches die Knotenkoordinaten des deformierten Netzes ausliest. Über die Position der Knoten lassen sich in einem zweiten Schritt die Elemente bzw. die Geometrie der Wabe generieren und zur Verfügung stellen. Zusätzlich können mit dem Skript die Materialeigenschaften sowie Informationen über die Elemente übertragen werden.

Für die Alu 182 Kerne, welche keine Wärmebehandlung erhalten, müssen zusätzlich zum deformierten Netz auch die Eigenspannungen des Materials für die Struktursimulation übernommen werden. Dazu wird die Funktion der Import-Analyse unter Abaqus verwendet, welche das gesamte Modell in eine neue Simulation überführt. Eine erneute Vernetzung der aufgestellten Kerne ist somit nicht nötig. Die idealen Kernegeometrien wurden nach dem gleichen Prinzip wie die aufgestellten Kerne vernetzt.

### 4.3. Material

Die Materialien für die jeweilige Struktursimulation werden durch das Skript bzw. die Import-Analyse aus der Aufstellsimulation übernommen. Eine Ausnahme bilden die Waben aus Aramidpapier, da während des Aufstellens aufgrund des B-Zustands, mit reduzierten Materialkennwerten gerechnet wird. Für die Struktursimulationen müssen die Werte des ausgehärteten Materials benutzt werden.

### 4.4. Lagerung und Lastfälle

Insgesamt werden drei verschiedene Normversuche pro Faltwabe simuliert. Eine Druckbelastung (D) in Anlehnung an DIN 53291, sowie eine Längsschubbelastung (SL) und eine Querschubbelastung (SW) in Anlehnung an DIN 53294. Die Belastung wird in allen Fällen als Knotenverschiebung vorgegeben, sodass alle Struktursimulationen weggeregelt sind. Als Verschiebung ist für alle Waben und Richtungen ein Wert von 0.01mm gewählt worden. Damit ist gewährleistet, dass sich die gesamten Verformungen im linear elastischen Bereich der Faltwabe befinden. Plastische Effekte sowie Materialversagen müssen infolgedessen nicht berücksichtigt werden. Die Einleitung der Verschiebung erfolgt für alle Faltkerne über ein Rigid-Element an der oberen Kante.

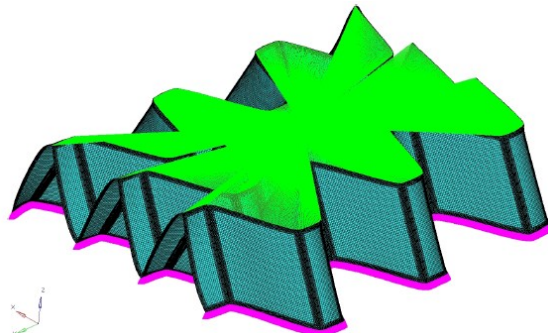


BILD 8. Schematische Lagerung 3x3 Wabe

An den unteren Kanten der Faltkerne erfolgt die Lagerung in Abhängigkeit des Lastfalls. Für den Drucklastfall werden die Knoten der Kanten in allen Freiheitsgraden gesperrt. Es treten keine überlagerten Belastungen auf, sodass es sich um einen reinen Drucklastfall handelt. Bei den beiden Schublastfällen werden nur die translatorischen Bewegungen in der Ebene unterbunden. Die Rotationsbewegungen sowie die Translation in Z-Richtung bleiben frei. Dadurch handelt es sich um einen reinen Schublastfall. Da die Waben aus Aluminium und Aramidpapier symmetrisch sind, werden zusätzlich noch symmetrische bzw. antisymmetrische Lagerbedingungen eingeführt. Mit zunehmender Modellgröße verringert sich jedoch der Einfluss der symmetrischen und antisymmetrischen Randbedingungen, sodass beim 3x3-Modell die Abweichung zur Simulation ohne symmetrische Randbedingungen nur ca. 2% beträgt.

## 5. VERGLEICH VON SIMULATION UND VERSUCH

Als Vergleichskriterium dient die prozentuale Abweichung der Steifigkeit vom idealen Kern. Als Referenz wird die Steifigkeit aus Simulationen mit einem optisch vermessenen Modell sowie Versuchswerte herangezogen. Um den Einfluss unterschiedlicher Lagerungen auszuschließen wird jeweils die Abweichung zu einem idealen Kern unter gleichen Randbedingungen ermittelt.

Der E- bzw. der G-Modul der einzelnen Modelle ergibt sich aus der auf die projizierte Fläche  $A_{proj}$  bezogenen Spannung.

### 5.1. Alu 182

Für die Ergebnisse der Einheitszellen der wärmebehandelten Waben (WB) ergeben sich mit bis zu 25,5% die größten Differenzen zum Versuchswert. Dies ist auf den fehlenden Stützeffekt durch angrenzende Zellen während des Aufstellens zurückzuführen, wodurch starke Imperfektionen entstehen. Das Resultat ist eine verringerte Steifigkeit und eine entsprechend hohe Abweichung von der idealen Geometrie. Mit zunehmender Modellgröße wird dieser Einfluss aus der Aufstellungssimulation geringer, sodass auch die absolute Steifigkeit der aufgestellten Kerne zunimmt und die maximale Differenz bei den 3x3-Modellen auf 16.24% reduziert werden kann.

Modell	$E_D$ [MPa]	$\Delta$ [%]
1x1 ideal	1055.23	-
1x1 WB	776.71	26.39
1x1	859.43	18.55
1x1 WB PBC	830.47	21.30
2x2 ideal	1048.07	-
2x2 WB	831.33	20.69
2x2	911.34	13.05
3x3 ideal	1045.98	-
3x3 WB	847.08	19.02
3x3	919.6	12.08
5x5 ideal	1045.03	-
5x5 WB	846.31	17.29
8x8	Versuchswert	2.78

TAB 2. Drucklastfall Alu 182

Der Versuchswert, welcher für den Drucklastfall auf der Basis eines 8x8-Modells und für den Querschublastfall an einem 8x14-Modell ermittelt wurde, kann auch mit dem zusätzlich eingeführten 5x5-Modell nicht erreicht werden. Dies ist auf die quadratische Zunahme der Zellenanzahl zurückzuführen, sodass das 5x5-Modell mit 25 Einheitszellen weniger als die Hälfte der 64 Zellen des 8x8-Modells besitzt. Die Simulation der Modelle in der abgescantten Größe (Druck 8x8-Modell, Querschub 14x8-Modell, Längsschub 8x14-Modell) war wegen der Feinheit der Vernetzung und der Rechenkapazität nicht möglich. Durch das Einführen von periodischen Randbedingungen (PBC) kann ebenfalls keine signifikante Verbesserung der Simulationsergebnisse erzielt werden. Die Abweichung der Steifigkeit fällt im Drucklastfall 5.09% geringer aus im Vergleich zur Standard Ein-

heitszelle (1x1 WB). Für den Querschublastfall verringert sich die Abweichung um 7.91%. Beide Lastfälle übersteigen nicht die Ergebnisse des 5x5-Modells wie es zu erwarten wäre. Dies ist auf eine fehlerhafte Kopplung der Ränder durch die periodischen Randbedingungen zurückzuführen, welche genauer untersucht werden muss.

Modell	$G_{SL}$ [MPa]	$\Delta$ [%]
1x1 ideal	60.94	-
1x1 WB	53.04	12.97
1x1	49.59	18.64
1x1 WB PBC	58.84	3.45
2x2 ideal	177.28	-
2x2 WB	137.97	22.18
2x2	161.36	8.98
3x3 ideal	215.8	-
3x3 WB	172.52	20.06
3x3	198.6	7.97
5x5 ideal	246.59	-
5x5 WB	200.72	18.60
8x14	Versuchswert	28.45

TAB 3. Längsschublastfall Alu 182

Im Gegensatz zum Druck- und Querschublastfall wird die Steifigkeit bei den wärmebehandelten Waben des Längsschublastfalls überschätzt, sodass die Steifigkeitsabweichung beim 3x3-Modell um ca. 8% höher liegt als bei der Referenzgeometrie. Die Zunahme der Steifigkeit durch die Modellgröße, welche sich auch im Längsschub einstellt, resultiert in einem ansteigenden Fehler, sodass auch bei größeren Modellen keine Verbesserung der Ergebnisse zu erwarten ist. Dies zeigt sich auch bei der Einführung der periodischen Randbedingungen, da die Abweichung hier 15.15% über der des 5x5-Modells liegt und der Fehler weiter ansteigt.

Modell	$G_{SW}$ [MPa]	$\Delta$ [%]
1x1 ideal	268.18	-
1x1 WB	205.5	23.37
1x1	276.97	-3.28
1x1 WB PBC	226.73	15.46
2x2 ideal	271.77	-
2x2 WB	223.97	17.59
2x2	262.4	3.45
3x3 ideal	273.16	-
3x3 WB	233.9	14.37
3x3	264.5	3.17
5x5 ideal	274.29	-
5x5 WB	241.89	11.81
14x8	Versuchswert	-1.36

TAB 4. Querschublastfall Alu 182

Bei den Aluminiumwaben ohne Wärmebehandlung fällt die Differenz zur idealen Geometrie beim Druck- und Querschublastfall mit maximal 15.77% deutlich geringer aus als bei den Kernen mit Wärmebehandlung. Durch den "spring-back" nach dem Aufstellvorgang weicht die Geometrie, insbesondere die Kernhöhe, dieser Waben von der geforderten Endgeometrie ab. Diese Geometrie zeichnet sich durch eine erhöhte Steifigkeit aus, sodass für den Querschublastfall mit einer Abweichung von maximal 5% ak-

zeptable Resultate erzielt werden können. Für den Drucklastfall kann ebenfalls eine Verbesserung erzielt werden, jedoch liegt hier die Differenz zum Versuchswert noch bei 9.3%.

Im Längsschublastfall wird, wie bereits beschrieben, durch eine Steifigkeitszunahme der Fehler größer. Aus diesem Grund stellt sich für die Faltkerne aus Reinaluminium ohne Wärmebehandlung in diesem Fall keine Verbesserung der Ergebnisse ein.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für das Aluminium die Ergebnisse stark vom jeweiligen Lastfall abhängen. Die Resultate des Längsschublastfalls weisen keine Konvergenz gegen den Versuchswert auf, für den Druck- und Querschublastfall sind die Ergebnisse näher am Referenzwert. Besonders beim Querschublastfall zeigen sich bei den Faltkernen ohne Wärmebehandlung gute Ergebnisse, welche bei allen Struktursimulationen höhere Steifigkeiten besitzen als die Waben mit Wärmebehandlung. Des Weiteren sind die Resultate der Einheitszelle nur sehr bedingt aussagekräftig.

## 5.2. PEEK 1000

Zusätzlich zu den Daten aus dem optisch vermessenen Modell liegen für das PEEK 1000 Messwerte aus Strukturversuchen vor.

Modell	$E_D$ [MPa]	$\Delta$ [%]
<b>1x1 ideal</b>	188.68	-
<b>1x1</b>	138.8	26.43
<b>2x2 ideal</b>	189.12	-
<b>2x2</b>	145.75	22.93
<b>3x3 ideal</b>	189.27	-
<b>3x3</b>	153.07	19.13
<b>5x7</b>	FEM 3D Scan Modell	54.95
<b>5x7</b>	Versuchswert	59.46

TAB 5. Drucklastfall PEEK 1000

Für den Drucklastfall wird die Steifigkeit des Faltkerns stark überschätzt. Während die Steifigkeit sich im Versuch um bis zu 60% gegenüber der idealen Geometrie reduziert, ist bei den aufgestellten Kernen nur eine Verminderung von maximal 26.43% zu verzeichnen. Mit zunehmender Modellgröße nimmt beim PEEK 1000 die Steifigkeit der Kerne zu, da auch hier ein Stützeffekt durch benachbarte Zellen beim Aufstellen entsteht. Dieser Effekt bewirkt einen größer werdenden Fehler im Drucklastfall für Modelle mit mehreren Zellen, analog zum Längsschublastfall beim Reinaluminium. Eine Vergrößerung des Modelles oder das Einführen von periodischen Randbedingungen schließt sich damit aus. Ein Grund für die Überschätzung der Steifigkeit und die daraus resultierende Abweichung im Drucklastfall sind die Prägkanten, welche durch eine ebene Geometrie angenähert wurden und somit steifer sind als in der Realität. Hinzu kommen die Abmessungen für die Wandstärke, welche aus bestehenden Datensätzen übernommen werden und somit nicht die Qualität der Daten des Aluminiums haben. Dieser Einfluss macht sich auch im Längsschublastfall bemerkbar. Es stellen sich Abweichungen von bis zu

40,06% zwischen den Versuchswerten und dem 2x2-Modell ein. Eine Konvergenz der Simulationsergebnisse gegen den Referenzwert ist nicht festzustellen, da die Resultate mit einer Abweichung von ca. 30% zwischen aufgestellter Geometrie und idealem Kern alle auf demselben Niveau liegen.

Modell	$G_{SL}$ [MPa]	$\Delta$ [%]
<b>1x1 ideal</b>	28.54	-
<b>1x1</b>	20.1	29.58
<b>2x2 ideal</b>	38.12	-
<b>2x2</b>	26.38	30.80
<b>3x3 ideal</b>	41.28	-
<b>3x3</b>	29.06	29.62
<b>5x13</b>	FEM 3D-Scan Modell	-1.85
<b>5x13</b>	Versuchswert	-9.26

TAB 6. Längsschublastfall PEEK 1000

Die Resultate des Querschublastfalls liegen mit einer Abweichung von maximal 18.57%, wie bei den Alu 182 Waben am nächsten am Referenzwert. Im Vergleich zu den übrigen Lastfällen des PEEK 1000 weist schon die Einheitszelle geringe Fehler auf. Für das 2x2-Modell sowie die 3x3-Geometrie ergibt sich eine Konvergenz gegen den Referenzwert. Im Vergleich zum Reinaluminium erfolgt hier die Konvergenz in großen Schritten, sodass bereits mit dem 3x3-Modell die Steifigkeitsabweichung um 9.67% überschätzt wird. Der Wert aus dem Versuch liegt somit zwischen den Simulationswerten aus dem 2x2- und 3x3-Modell.

Modell	$G_{SW}$ [MPa]	$\Delta$ [%]
<b>1x1 ideal</b>	12.32	-
<b>1x1</b>	11.8	4.28
<b>2x2 ideal</b>	15.74	-
<b>2x2</b>	17.11	-8.70
<b>3x3 ideal</b>	16.95	-
<b>3x3</b>	21.01	-23.96
<b>5x13</b>	FEM 3D-Scan Modell	-14.29
<b>5x13</b>	Versuchswert	-14.29

TAB 7. Querschublastfall PEEK 1000

Bei allen Lastfällen unterscheidet sich auch für das PEEK 1000 die Größe des Referenzmodells im Vergleich zum simulierten Modell, was einen zusätzlichen Grund für Fehler darstellt. Im Vergleich zum Reinaluminium können für den Längsschublastfall und den Querschublastfall ähnliche Effekte beobachtet werden.

## 5.3. N637

Trotz diverser Ansätze ist es für das N637 nicht möglich eine aufgestellte Kerngeometrie über die Einheitszelle hinaus zu simulieren. Somit können lediglich Abweichungen bezogen auf die Einheitszelle verglichen werden, welche nur bedingt aussagekräftig sind. Hinzu kommt, dass der aufgestellte Kern aufgrund der unterdrückten Instabilität Imperfektionen aufweist, welche bei den realen Waben nicht auftreten, wie im optischen Vergleich festgestellt wurde.

Modell	$E_D$ [MPa]	$\Delta$ [%]
<b>1x1 ideal</b>	358.2	-
<b>1x1</b>	197.953	44.74
<b>2x2 ideal</b>	356.78	-
<b>3x3 ideal</b>	356.31	-
<b>5x6</b>	FEM 3D-Scan Modell	5.26

TAB 8. Drucklastfall N637

Modell	$G_{SL}$ [MPa]	$\Delta$ [%]
<b>1x1 ideal</b>	17.69	-
<b>1x1</b>	13.18	25.48
<b>2x2 ideal</b>	38.55	-
<b>3x3 ideal</b>	45.5	-
<b>5x6</b>	FEM 3D-Scan Modell	10.29

TAB 9. Längsschublastfall N637

Für den Drucklastfall ergibt sich infolge dieser Einflüsse mit 39.48% die größte Differenz zwischen idealer Geometrie und numerisch simuliertem Kern. Im Gegensatz zum Alu 182 und dem PEEK 1000 erreicht das N637 im Längsschublastfall den geringsten Fehler. Die Abweichung zum Referenzwert liegt mit 15.29% in der gleichen Größenordnung wie die Resultate des Drucklastfalls für Alu 182. Eine Aussage über den Einfluss der Modellgröße kann in diesem Zusammenhang nicht getroffen werden. Beim Querschublastfall ergibt sich für die Einheitszelle eine Abweichung von 31.62%. Damit zeigt sich auch hier für das N637 ein abweichendes Verhalten zu den beiden anderen Waben. Aufgrund der geringen Anzahl an Ergebnissen sind die Resultate des Aramidpapiers jedoch kritisch zu betrachten.

Modell	$G_{SW}$ [MPa]	$\Delta$ [%]
<b>1x1 ideal</b>	75.75	-
<b>1x1</b>	45.30	44.19
<b>2x2 ideal</b>	76.78	-
<b>3x3 ideal</b>	77.133	-
<b>5x6</b>	FEM 3D-Scan Modell	8.57

TAB 10. Querschublastfall N637

## 6. FAZIT

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Qualität der Ergebnisse stark vom jeweiligen Lastfall und dem Material abhängig ist. Für das Alu 182 und das PEEK 1000 können im Querschublastfall mit Abweichungen von ca. 6% akzeptable Ergebnisse erzielt werden. Für die übrigen Lastfälle und das N637 treten Abweichungen von bis zu 40% auf. Dennoch ist die vorgestellte Methode vorteilhafter, als mit der idealen Geometrie zu rechnen.

Als maßgeblicher Einflussfaktor ergibt sich die Modellgröße und somit die Gesamtzellenanzahl des Modells. In Bezug auf die Faltkanten ist eine genaue Kenntnis der Wandstärke sowie der Kanten geometrie erforderlich um die Steifigkeit exakt abbilden zu können.

Weiteres Potenzial bietet der Aufstellvorgang über

zwei Matrizen. Insbesondere für komplexere Materialien wie das N637 bieten sich hier gute Möglichkeiten einen aufgestellten Kern zu simulieren. Das virtuelle Abbilden und Vorhersagen der Imperfektionen ist eine vielversprechende Methode zur besseren Auslegung von Sandwichkomponenten. Um die Ergebnisqualität zu verbessern sind folgende Maßnahmen geplant: Integration periodischer Randbedingungen, exaktere Untersuchung der Faltkanten und Weiterentwicklung des Aufstellvorgangs über zwei Matrizen.

## 7. REFERENZEN

- [1] Prof. Dr. Ing. Peter Middendorf, Prof. Franz Joseph Arendts, Dipl. Ing. Maged Sorour. Leichtbau Vorlesungsskript, Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, 2012
- [2] Prof. Dr. Klaus Drechsler. Werkstoffe und Fertigungsverfahren der Luft- und Raumfahrttechnik. Vorlesungsskript, Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, 2009
- [3] Dipl.-Ing. Sebastian Fischer. Numerische Simulation der mechanischen Eigenschaften von Faltern-Sandwichstrukturen. Dissertation, Universität Stuttgart, September 2012.
- [4] Dipl.-Ing. Sebastian Heimbs. Sandwichstrukturen mit Wabenkern: Experimentelle und numerische Analyse des Schädigungsverhaltens unter statischer und kurzzeitdynamischer Belastung. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Januar 2008.
- [5] Dr.-Ing. Sebastian Heimbs. Virtual testing of sandwich core structures using dynamic finite element simulations. Computational Materials Science, 45: S.205–216, April 2009.
- [6] M.R.M. Rejab, W.J. Cantwell. The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels. Composites Part B: Engineering, 47: S.267–277, April 2013