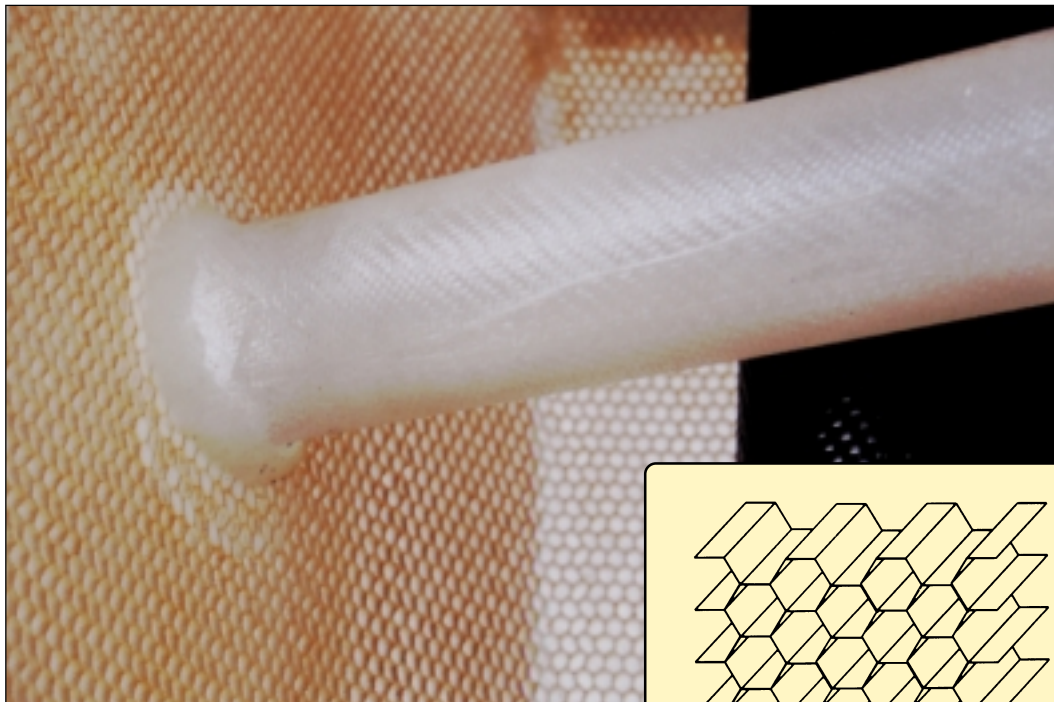


Sandwich-Leichtbauteile in Wabenbauweise

Eine allgemeingültige Einführung
in die Leichtbauweise
mit Aramid-Waben



In Zusammenarbeit mit:

Dipl.-Ing. Herbert Funke
Laboratorium für
Konstruktionslehre
Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Jorden

Universität-GH
Paderborn

Höchstleistungen durch Wabensandwichbauweise



Dipl.-Ing. Herbert Funke
Laboratorium für Konstruktionslehre
Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Jorden

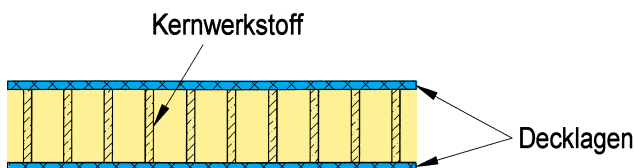


Universität-GH Paderborn

Immer weiter steigende Anforderungen an technische Produkte erfordern den Einsatz neuer, leistungsfähigerer Werkstoffe. Überall dort, wo hohe Leistung, d.h. **hohe mechanische Festigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht** gefordert wird, stößt man mit den traditionellen Werkstoffen häufig an unüberwindbare Leistungsgrenzen. Erst neue Werkstoffe, hier insbesondere Faserverbundwerkstoffe, erweitern Leistungshorizonte in vielen Anwendungsbereichen. So haben Faserverbundwerkstoffe in den letzten Jahren gerade in der Luft- und Raumfahrt, aber auch in manchen Bereichen des Spitzensportes einen triumphalen Siegeszug vollziehen können. Ob Space-Shuttle oder Rundfunksatellit, ob Formel 1-Rennwagen oder Abfahrtskii, immer öfter sind Höchstleistungen ohne Faserverbundwerkstoffe kaum noch vorstellbar.

Dabei müssen diese Werkstoffe nicht nur ein Privileg für Ausnahmearwendungen sein, denn auch viele scheinbar ganz alltägliche Anforderungen sind nur durch Höchstleistungen zu erfüllen. Ein Beispiel hierfür sind die steigenden Anforderungen, wenn es darum geht, die **Umwelt zu schonen** und Ressourcen zu sparen. Nahezu im gesamten Bereich des Transportwesens ist Gewichtseinsparung gleichzusetzen mit **Energieeinsparung**. Die konsequente Umsetzung des Leichtbaus kann hier die Umwelt gleich zweifach entlasten: Weniger Materialeinsatz in den Transportmitteln schont Ressourcen und senkt den Energieverbrauch während der gesamten Einsatzdauer.

Die einfachste Art, Gewicht zu sparen ist, die **Wandstärke** von Bauteilen auf das Mindestmaß zu reduzieren, welches zur Kraftübertragung erforderlich ist. Gerade bei großflächigen Schalenstrukturen wie Karosseriebauteilen, Verkleidungen, Abdeckungen u.ä. ist ein sehr großes Einsparpotential vorhanden, da die ebenen Belastungen hier im allgemeinen gering sind. Um eine ausreichende **räumliche Steifigkeit** (Beulsteifigkeit) zu erhalten, werden solche Schalenelemente dennoch unter zumeist viel zu hohem Materialeinsatz mit wesentlich dickerer Wandstärke ausgeführt. Die Leichtbaulösung zu diesem Dimensionierungsproblem lautet schlicht und einfach: **Sandwichbauweise**.



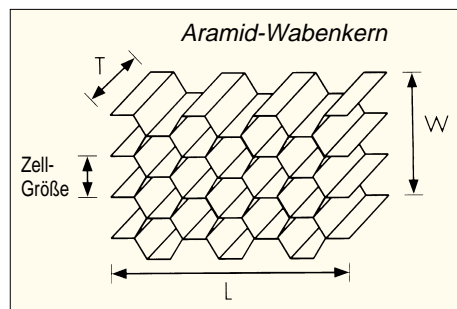
Der leichte, druckfeste Kernwerkstoff hat die Aufgabe, die beiden dünnen Decklagen auf Abstand zu halten. Dadurch wird eine große effektive Wandstärke bei geringem Gewicht erreicht.

Das Prinzip einer **Sandwichbauweise** beruht darauf, daß zwischen zwei dünnen Decklagen ein **leichtes, druckfestes Kernmaterial** eingebracht wird. Dadurch kann bei geringem Materialeinsatz und minimalem Gewicht eine große Wandstärke realisiert werden. Als Deckschichtmaterialien für eine solche Wabenbauweise sind besonders dünne GFK-Lamine geeignet. Je nach Anforderungsprofil können natürlich auch SFK- oder CFK-Lamine verwendet werden.

Beim Kernwerkstoff werden die besten Ergebnisse mit **Aramid-Wabenkernen** erzielt. Sie sind anderen Stützstoffen wie Balsaholz und Schaumstoffen aufgrund des geringeren Gewichtes, der höheren mechanischen Festigkeit und der guten Verklebbarkeit deutlich **überlegen**.

Außerdem sind Aramid-Wabenkerne mit unterschiedlichen Zellendurchmessern und in unterschiedlichen Raumgewichten erhältlich, so daß durch eine gezielte Auswahl ein maßgeschneiderter Kernwerkstoff für jede Anwendung bereitsteht.

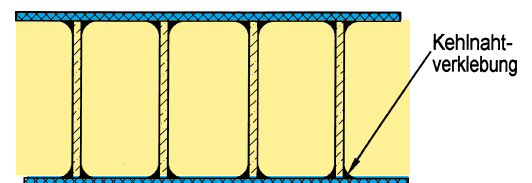
Lagermäßig ist von R&G der Wabenkern mit einem **Zellendurchmesser von 3,2 mm** lieferbar. Die besonderen Eigenschaften dieses Aramid-Wabenkernes sind:



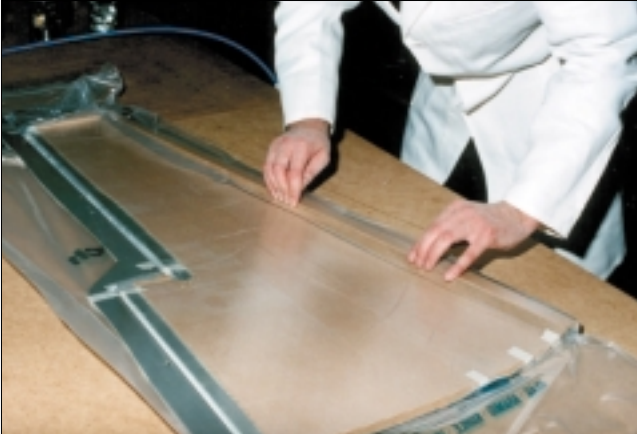
- **geringe Dichte** ab 29 g/dm³
- **hohe Druckfestigkeit** von mindestens 0,54 N/mm²
- **hohe Schubfestigkeit** von mindestens 0,56 N/mm² (L-Richtung)
- **sehr gute Verklebbarkeit** mit faserverstärkten Kunststoffen
- **hohe Drapierfähigkeit**

Aufgrund ihrer Bienenwabenstruktur werden diese Wabenkerne auch als **Honeycomb** bezeichnet. Grundstoff für die Herstellung ist **Nomex®-Papier**, in dem Aramidfasern mit Phenolharz gebunden sind.

Aramid-Wabenkerne können besonders gut zur Versteifung großflächiger faserverstärkter Kunststoffbauteile eingesetzt werden. Wichtig ist hierbei insbesondere eine gute Verklebung mit den Decklaminaten. Gerade wegen ihrer papierartigen Struktur des Grundstoffes lassen sich die Aramid-Wabenkerne besonders gut mit faserverstärkten Kunststoffen verkleben. Beim Verkleben mit dünnflüssigen Laminierharzen saugt der Wabenkern das Harz an, und es bildet sich eine **Kehlnahtverklebung** aus, die für eine sehr gute Verbindung zwischen Wabenkern und Decklaminat sorgt.



Erst durch Ausbildung einer Kehlnahtverklebung wird eine optimale Verbindung zwischen Wabenkern und Deckschicht erreicht.



Als Faustregel gilt: Je flacher eine Form ist, desto einfacher lassen sich darin Wabensandwichbauteile herstellen.

Welche Bauteile lassen sich in Wabensandwichbauweise herstellen?

Die Vorteile der Wabensandwichbauweise kommen besonders bei **großflächigen Bauteilen**, die eine räumliche Versteifung erfordern, zur Geltung. Große Schalenelemente können hierbei ganzflächig eine glatte Außenfläche aufweisen.

Eine zusätzliche räumliche Versteifung durch Kanten und Sicken, wie bei GFK-Bauteilen sonst üblich, ist hier nicht erforderlich. Allerdings sollten Bauteile in Wabensandwichbauweise über möglichst große **Rundungs- und Wölbungsradien** verfügen, da das Verpressen des Wabenkernes in Ecken und Kanten recht schwierig ist.

Welche Materialkombinationen sind für welche Bauteile geeignet?

Für die Decklaminare sind unterschiedliche Materialkombinationen möglich, die mit dem entsprechenden Wabenkern abgestimmt werden sollten. Für jedes Bauteil ist deshalb eine individuelle Gewebeauswahl erforderlich, wenn man optimale Ergebnisse erzielen möchte. Zur Erleichterung dieser Auswahl dienen die folgenden Kriterien:

→ Bei **Hohlkörpern**, die keine glatten Innenflächen erfordern (z.B.: Rumpfe, Tragflächen, Abdeckungen etc.), hat es sich als günstig erwiesen, das **innere Decklaminat** schwächer als das **äußere Decklaminat** auszuführen. Dies gilt insbesondere dann, wenn diese Innenflächen keiner Stoß- oder Kratzbeanspruchung ausgesetzt sind.

→ In den meisten Fällen sind **GFK-Decklaminare** völlig ausreichend. Eine höhere Beulsteifigkeit läßt sich einfacher und preiswerter durch die Wahl eines dickeren Wabenkernes als durch die höhere Steifigkeit eines CFK-Decklaminates erzielen.

→ Bei **extremen Anforderungen** an die **Steifigkeit** in Sandwichebene, an die Wechselfestigkeit bei schwingender Beanspruchung oder an die Dimensionsstabilität bei unterschiedlichen Temperaturen, werden mit **CFK-Deckschichten** die besten Resultate erzielt. Außerdem bietet CFK gegenüber den GFK-Deckschichten einen geringen Gewichtsvorteil.

→ Die **größte Gewichtseinsparung** wird mit Aramid-Deckschichten erreicht. Zudem hat Aramid eine sehr hohe Schlagzähigkeit, so daß mit Aramid-Deckschichten die ohnehin schon sehr hohe Energieaufnahme des Sandwiches im Crashfall nochmals deutlich gesteigert werden kann. Zu berücksichtigen sind

hier jedoch die Delaminationsgefahr bei Aramidlaminaten sowie die Schwierigkeiten, die bei der Verarbeitung von Aramid auftreten können.

Wie dick sollten Decklaminare und Wabenkerne sein?

Die Decklaminare müssen alle Belastungen in Ebenenrichtung aufnehmen können. Diese Belastungen sind bei Schalenbauteilen im allgemeinen gering, so daß häufig nur **sehr dünne Decklaminare** erforderlich sind. Damit sich bei sehr dünnen Decklaminaten die Wabenstruktur nicht auf der Außenseite abzeichnet, ist hier jedoch eine Laminatmindeststärke erforderlich. Erfahrungsgemäß sollte das Verhältnis von Laminatstärke zu Wabenzelldurchmesser von 1/30 nicht deutlich unterschritten werden.

Das bedeutet:

Bei dem Standardwabenkern mit einem Zelldurchmesser von 3,2 mm ist eine Laminatstärke für das äußere Decklaminat von mindestens **0,1 mm** erforderlich.

Diese wird beispielsweise mit zwei Lagen 49 g/m² oder mit einer Lage 105 g/m²-Glasgewebe erreicht. Diese Laminare haben sich bei kleineren Bauteilen wie Modellflugzeuigrümpfen und Tragflächen bestens bewährt. Für das innere Decklaminat reichte in diesen Fällen sogar ein einlagiges Laminat aus 49 g/m²-Glasgewebe aus.

Mit einer Wabenkernstärke von 2 mm sind selbst Rumpfe von größeren Flugmodellen noch um ein Vielfaches druck- und beulsteifer gegenüber jeder anderen Bauweise. Die nachstehende Tabelle zeigt einige Beispiele für die Werkstoffauswahl bei Wabensandwichbauteilen. Die Angaben sind als grobe Anhaltswerte für die Dimensionierung von Decklaminaten und Wabenkernen zu verstehen. Ausgangsbasis sei hier immer ein Wabenkern mit einem Zelldurchmesser von 3,2 mm.



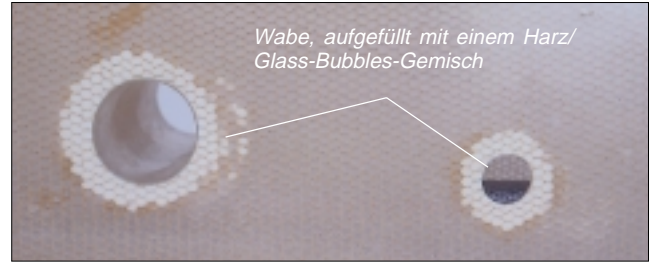
Das F3A-X Kunstflugmodell ist komplett in Wabensandwichbauweise aufgebaut. Mit Deckschichten aus 49 g/m²-Glasgewebe und einem 2 mm Wabenkern wird eine hohe Steifigkeit bei geringstem Gewicht erzielt.

Wie können Krafteinleitungen gestaltet werden?

Besondere Aufmerksamkeit ist bei der Gestaltung von **Krafteinleitungen** erforderlich. Belastungen müssen auf direktem Wege in die Decklaminare eingeleitet werden. Dabei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

→ Kräfte sollten möglichst als **Schubbelastung in Ebenenrichtung** in das Sandwich eingeleitet werden. Im Bereich der Krafteinleitung wird der Wabenkern mit einem Harz-Microballongemisch aufgefüllt. Je nach Höhe der Belastung werden die Decklaminare ggf. lokal mit zusätzlichen Gewebelagen verstärkt.

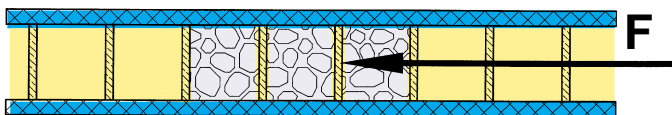
→ Zur Einleitung von **Momenten** oder **Kräften** senkrecht zur Sandwichebene ist in den meisten Fällen eine geeignete Anordnung von Spanten, Rippen oder ähnlichen Einbauten erforderlich. Bei Stoßbelastungen mit unterschiedlichen Belastungsrichtungen hat es sich zudem als günstig erwiesen, das Waben-sandwich im Bereich der Krafteinleitung durch ein verstärktes Vollaminat zu ersetzen. Durch die bessere Verformbarkeit ist hier eine höhere Energieaufnahme des Vollaminates möglich.



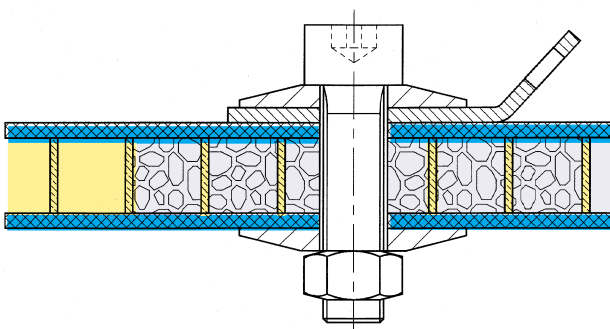
Krafteinleitung als ebene Schubbelastung bei der Tragflügelsteckung eines Modellflugzeugumpfes

Fläche einer Halbschale	Bauteil-Beispiel	Art der Anforderung	äußeres Decklaminat	Wabekern-stärke	inneres Decklaminat	circa Sandwich-gewicht*
< 0,4 m ²	Modellflugzeugumpf	geringe Belastung	2 x 49 g/m ² Glasgewebe	2 mm	1 x 49 g/m ² Glasgewebe	350 g/m ²
< 0,8 m ²	sehr großer Modellflugzeugumpf	mäßige Belastung	1 x 105 g/m ² Glasgewebe 1 x 49 g/m ² Glasgewebe	2 mm	1 x 49 g/m ² Glasgewebe	440 g/m ²
< 1,5 m ²	Motorhaube eines UL-Flugzeugs	hohe Schlagfestigkeit	2 x 105 g/m ² Glasgewebe 1 x 80 g/m ² Glasgewebe	2 mm	1 x 80 g/m ² Glasgewebe	870 g/m ²
< 1,5 m ²	sehr großer Modelltragflügel	hohe Beulsteifigkeit	1 x 105 g/m ² Glasgewebe 1 x 49 g/m ² Glasgewebe	5 mm	1 x 80 g/m ² Glasgewebe	580 g/m ²
< 4,0 m ²	nicht tragende Abdeckhaube	mäßige Beanspruchung	2 x 105 g/m ² Glasgewebe 1 x 80 g/m ² Glasgewebe	5 mm	1 x 80 g/m ² Glasgewebe	1000 g/m ²
< 4,0 m ²	Tragflügel eines UL-Flugzeuges	hohe Beul- und Zugfestigkeit	2 x 93 g/m ² Kohlegewebe 1 x 49 g/m ² Glasgewebe	8 mm	1 x 80 g/m ² Glasgewebe	900 g/m ²

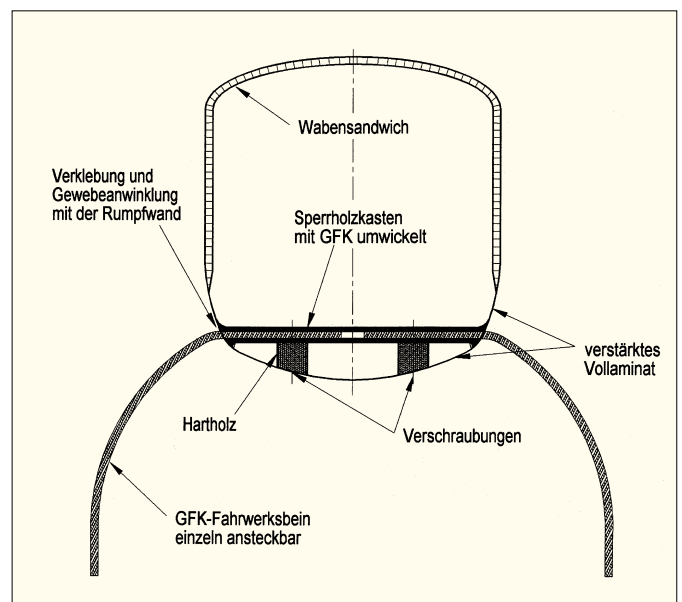
* errechnetes Gewicht eines entsprechenden Sandwiches bei einem Decklagen-Faservolumengehalt von 40 % sowie 2 x 30 g/m² Klebeharz zum Verkleben des Wabekerns.



Günstig ist die Krafteinleitung als Schubbelastung in Ebenen-richtung



Bei Verschraubungen sorgen Unterlegscheiben für eine großflächige Krafteinleitung.



Fahrwerkseinbau bei einem Modellflugzeugumpf in Wabensandwichbauweise. Das Fahrwerk ist einfach abnehmbar, die Krafteinleitung ermöglicht eine hohe Energieaufnahme bei geringem Gewicht.

Wie wird ein Wabensandwich hergestellt?

Wabensandwichbauteile werden, wie andere faserverstärkte Bauteile auch, zumeist in entsprechenden Negativformen hergestellt. Dabei wird zunächst das äußere Decklaminat wie bei Vollaminatbauteilen, nur in wesentlich geringerer Wandstärke laminiert. Bei sehr dünnen Deckschichten muß das äußere Decklaminat vollständig aushärten, bevor der Wabekern verklebt werden kann, damit sich die Wabenstruktur später nicht auf der Bauteilaußenseite abzeichnet. Die Verklebung erfolgt mit sehr dünnflüssigem Laminierharz, das zuvor mit der Moltoprenwalze auf das **angeschliffene** Laminat gerollt wurde. Eine gute Verbindung kann dabei nur erzielt werden, wenn der Harzauftrag sehr gleichmäßig erfolgt. Nicht die Menge, sondern die Gleichmäßigkeit des Harzauftrags stellt sicher, daß hier keine Fehlstellen entstehen. Solange das Harz aushärtet, muß der Wabekern fest auf das Decklaminat gepreßt werden. Dieses geschieht in den meisten Fällen im **Vakuumverfahren** (ein Verpressen mit Gegenformen ist eher selten, bei bestimmter Bauteilgeometrie aber durchaus auch möglich.) Nach dem Aushärten wird der Wabekern an Krafteinleitungsstellen bzw. späteren Bauteildurchbrüchen lokal mit einem Microballons-Harzgemisch gefüllt. Wo erforderlich, ist ein mechanisches Nacharbeiten des Wabekernes mit Fräsern oder grobem Schleifpapier möglich. Das innere Decklaminat wird, bevor es nun ebenfalls im Vakuum mit dem Wabekern verklebt wird, auf einer Folie vorgetränkt. Dadurch wird verhindert, daß die Wabenhohlräume mit Harz volllaufen.

Halbschalenelemente werden unter Nutzung der offengelegten Wabenhohlräume, die sich beim Beschneiden der Kanten ergeben, verklebt. Damit steht als Klebefläche die gesamte Wabekernstärke zur Verfügung. Bei der Verklebung mit angedicktem Harz erübrigt sich dadurch zumindest bei nicht sicherheitsrelevanten Bauteilen eine zusätzliche Verstärkung.

Wie funktioniert das Verpressen im Vakuum ?

Beim Vakuumverpressen wird die Form in eine luftdichte „Tüte“ verpackt, aus der anschließend die Luft abgesaugt und mit einer Vakuumpumpe ein möglichst hoher Unterdruck erzeugt wird. Dabei werden dann alle Teile in dieser „Tüte“ vom Umgebungsdruck zusammengepreßt. Der von der Vakuumpumpe erzeugte Unterdruck sollte dabei möglichst hoch sein, damit ein maximaler Anpreßdruck zwischen Decklaminat und Wabekern erzeugt wird. So wird bei einem Unterdruck von 0,9 bar ein Anpreßdruck von 0,9 N/mm² erzeugt. Das entspricht einer **Gewichtskraft von 9 Tonnen pro Quadratmeter!**

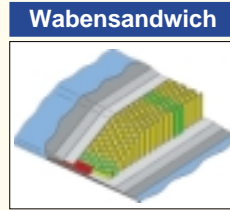
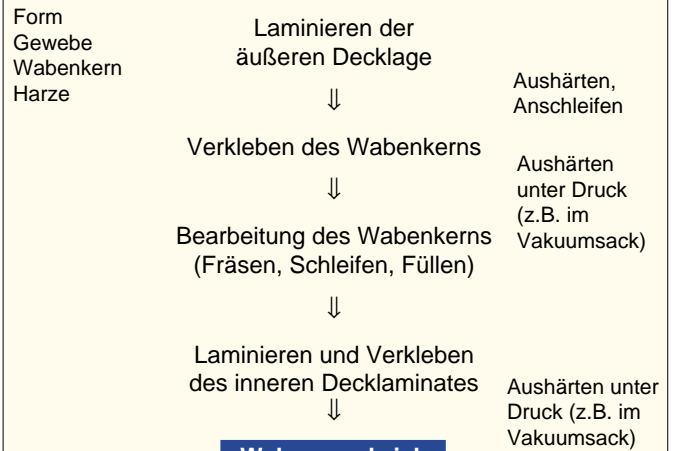
Was ist zum Verpressen im Vakuum erforderlich ?

Der Aufbau einer Vakuumeinrichtung ist denkbar einfach: Foliensäcke können aus PE-Folie hergestellt werden, die zusammengefaltet und ringsherum mit Acryl-Dichtmasse aus der Kartusche abgedichtet wird. Für kleine Formen eignet sich auch besonders gut der R&G-Folienschlauch (550 mm Breite). Der Anschluß des Luftschlauches erfolgt mit einem Vakuumanschluß.

Zur Kontrolle des Unterdruckes ist ein Manometer erforderlich. R&G bietet drei unterschiedliche Vakuumpumpen an. Die preiswerte **Vakuumpumpe P 1** ist besonders für kleine Formen geeignet. Sie erzeugt ein Vakuum von 75 % und hat zudem einen sehr geringen Stromverbrauch. Die Pumpenförderleistung ist allerdings gering, so daß bei größerem abzusaugendem Luftvolumen zunächst mit einem Staubsauger abgesaugt werden sollte.

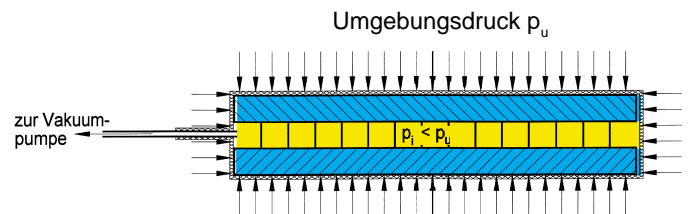
Die **Vakuumpumpen P 2 und P 3** sind für den professionellen Einsatz geeignet. Sie haben ein großes Fördervolumen und erreichen ein Endvakuum von > 900 mbar.

Herstellung eines Wabensandwiches



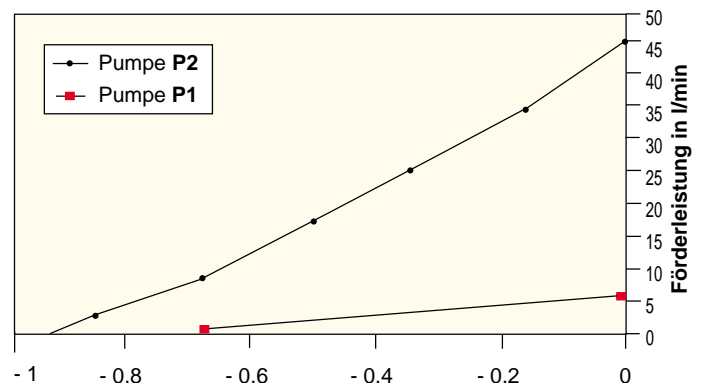
Als zusätzliche Leitregel gilt

Ziel	Maßnahme
Beulsteifigkeit erhöhen	→ größere Wabekernstärke
Festigkeit erhöhen	→ Laminatstärke erhöhen
Stoßfestigkeit erhöhen	→ Wabenstärke verringern und Decklaminatstärke erhöhen



Beim Verpressen im Vakuumsackverfahren wird der Umgebungsdruck ausgenutzt.

Pumpenkennlinien



Was kann man tun, um die Delaminationsgefahr zu verringern?

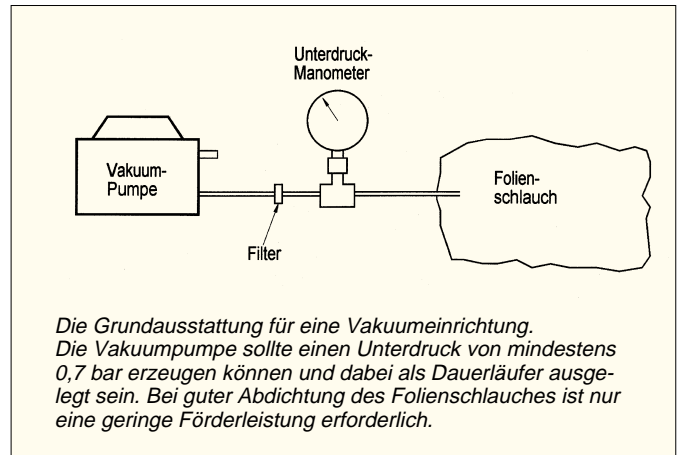
Die vorabbeschriebene Vorgehensweise reicht in aller Regel aus, um eine ausreichend feste Verbindung zwischen Decklaminat und Wabenkern zu erreichen. Bei sicherheitsrelevanten Bauteilen, wie z.B. Flugzeugbauteilen im manntragenden Flugzeugbau sollten jedoch Maßnahmen getroffen werden, die die Qualität der Verklebung steigern und die Delaminationsgefahr verringern. Dabei gilt es insbesondere, die Klebefestigkeit zwischen dem äußeren Decklaminat und dem Wabenkern zu erhöhen, da hier am ehesten durch äußere Gewalteinwirkung (Schlag-, Stoßbeanspruchung) Beschädigungen eintreten, die im Extremfall zu weiterer Delamination führen können. Für größere Bauteile eines UL-Flugzeuges hat sich folgende Vorgehensweise bewährt: Bei etwas dickerem äußerem **Decklaminat ab 0,2 mm** ist es nicht mehr unbedingt erforderlich, dieses vor dem Verkleben des Wabenkernes vollständig aushärten zu lassen. Nach dem Anhängen, gerade wenn die Kanten geschnitten werden können, wird direkt weitergearbeitet. Auf das angehärtete Laminat wird ein 80 g/m^2 Glasgewebe aufgelegt. Das trockene Gewebe haftet nur leicht an, so daß Falten zunächst gut mit der Hand ausgestrichen werden können. Das 80 g/m^2 Glasgewebe ist ein sehr offenes Gewebe, das daher beim anschließenden Tränken mit dünnflüssigem Laminierharz eine erhöhte Harzaufnahme aufweist. In dieses Laminat wird die Wabe gepreßt. Damit kann der Wabenkern in das ca. $0,1 \text{ mm}$ starke Glaslaminat einsinken. Das 80 g/m^2 Glasgewebe hat hier die Funktion einer Kupplungsschicht. Durch die erhöhte Harzaufnahme stellt es zudem genügend Harz für eine sichere Verklebung zur Verfügung.

Hinweis: Eine besondere Schwierigkeit beim Verkleben des Wabenkernes ist es, bei größeren Bauteilen einen gleichmäßigen Klebeharzauftrag zu gewährleisten. Stellen, an denen nicht genügend Harz aufgetragen wurden, führen zu Fehlverklebungen. Hier hat es sich in der Praxis als besonders hilfreich erwiesen, wenn das äußere Decklaminat eine Kontrastfarbe zum trockenen weißen Glasgewebe aufweist. Bei Kohlefasergewebe (schwarz) bzw. Aramidgewebe (gelb) im äußeren Decklaminat ist dieses automatisch gegeben.

Bei Glasgewebelaminaten mit weißer Deckschicht kann hinter die Deckschicht eine Kontrastfarbe gespritzt werden. Während das trocken aufgelegte Glasgewebe zunächst weißlich schimmert, läßt sich der Tränkungsgrad am Durchscheinen der Kontrastfarbe sehr deutlich erkennen. Fehlverklebungen aufgrund mangelnden Harzauftrages können damit nahezu ausgeschlossen werden.



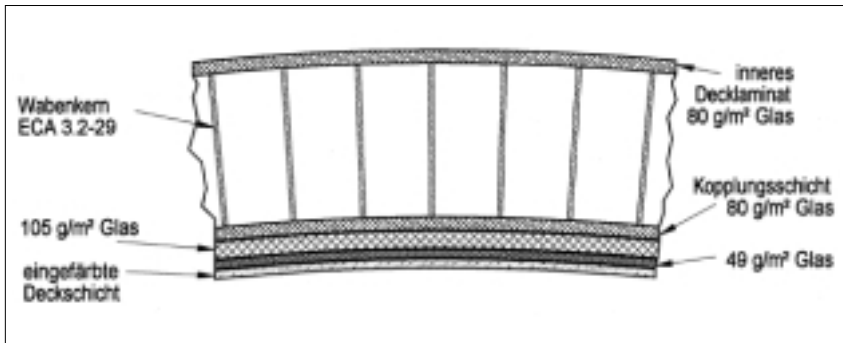
Das trockene Glasgewebe schimmert weißlich. Mit Laminierharz getränkt scheint die Kontrastfarbe durch. Auf diese Weise läßt sich der Tränkungsgrad der Kupplungsschicht sehr sicher kontrollieren. Fehlverklebungen aufgrund mangelnden Harzauftrages werden dadurch nahezu ausgeschlossen.



Auch im **Formenbau** werden mittlerweile Waben eingesetzt. Gerade große Formen, wie hier am Beispiel eines Motorflugzeugs, werden sehr leicht und steif.



Flugzeugrumpf in Waben-Sandwichbauweise (Projekt Silence)



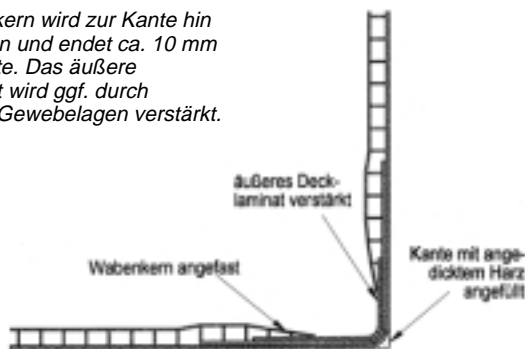
Mit einem 80 g/m²-Glasgewebe als Kopplungsschicht läßt sich bei nur geringem Gewichtszuwachs die Klebefestigkeit zwischen Wabenkern und Decklaminat deutlich erhöhen.

Damit überall ein gleichmäßiger Druck anliegt und keine Vertiefungen überspannt werden, muß die Folie großzügig in Falten gelegt werden.

Wie können Ecken und Kanten gestaltet werden?

Eine Versteifung durch die stark vergrößerte Wandstärke beim Wabensandwich ist nur auf größeren Flächen erforderlich. Ecken und Kanten bewirken zumeist schon eine ausreichende räumliche Versteifung. Zudem lassen sich Wabenkern und inneres Decklaminat nur schwierig in scharfe, tiefe Kanten hineinpressen, so daß hier die Gefahr einer Fehlverklebung besonders hoch ist. Aus diesen Gründen sollte in Ecken und Kanten, soweit sie denn überhaupt am Sandwichbauteil erforderlich sind, der Wabenkern ausgespart werden. Einige wenige zusätzliche Gewebestreifen im äußeren Decklaminat reichen hier für eine ausreichende Versteifung meistens aus. Bei höheren Beanspruchungen können zusätzlich auch noch Rovings entlang der Kante verlegt werden.

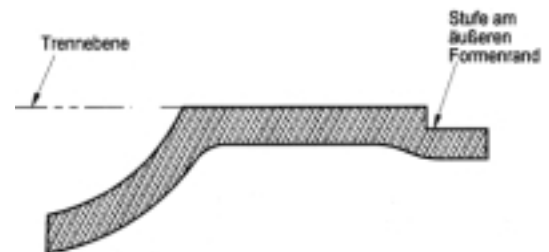
Der Wabenkern wird zur Kante hin angeschliffen und endet ca. 10 mm vor der Kante. Das äußere Decklaminat wird ggf. durch zusätzliche Gewebelagen verstärkt.



Wie gestaltet man Formen, damit man sie Vakuum ziehen kann?

Kleine Formen werden vorzugsweise komplett in einem Vakuumsack verpreßt. Hierbei dürfen die Formen über keinen versteifenden Hinterbau aus Rippen oder Spanten verfügen. Andererseits müssen die Formen steif genug sein, damit sie sich auch ohne Hinterbau nicht verziehen. Für kleinere Formen bis ca. 0,5 m² ist dabei eine Formenwandstärke von ca. 5 mm erforderlich. Bei GFK-Formen müssen dazu schon bis zu 10 Gewebelagen 390 g/m²-Gewebe laminiert werden. Hier hat sich aber auch die Bauweise von Formen mit Laminierkeramik bestens bewährt. Wichtig ist, daß die Form auf der Vorder- und Rückseite keine scharfen Ecken aufweist, an denen der Folienschlauch einreißen könnte. Steile Vertiefungen sind ebenso ungünstig, da dort recht schwierig zu gewährleisten ist, daß der Folienschlauch überall anliegt.

Generell gilt: Je flacher eine Form ist, desto einfacher kann sie vakuumgezogen werden. Große Formen lassen sich oft nur schwierig komplett in einen Folienschlauch einsetzen. Hier empfiehlt es sich, die Folie auf dem Formenrand abzudichten. Dazu muß die Form selber luftdicht sein. Bohrungen für Paßstifte oder Formenverschraubungen dürfen nicht innerhalb des abzudichtenden Bereiches liegen. Eine Zentrierung von Formenhälften aufeinander kann einfach mit den herausnehmbaren dreiteiligen Paßstiften von R&G geschehen. Damit die elastische Dichtmasse beim Vakuumziehen nicht in die Form hineinläuft, hat es sich bewährt, den Formenrand entsprechend stufig zu gesta-



äußeren Rand das Abdichten.

Generell ist vor der Herstellung eines vakuumgezogenen Bauteils zu empfehlen, die Form einmal probeweise vakuum zu ziehen. Hierbei zeigt sich schnell, wo sich eventuell Schwierigkeiten beim Absaugen und einer gleichmäßigen Druckverteilung ergeben könnten. Bei größeren Formen wird man weiterhin ein luftdurchlässiges grobes Gewebe bzw. Polyestervlies zwischen die Vakuumfolie und die weiteren Lagen legen, damit sich der Unterdruck schnell und gleichmäßig aufbauen kann.



Vakuumgezogene Form eines UL-Tragflügels. Auf der 9 m² großen Form wirkt eine Anpreßkraft von insgesamt 45 Tonnen.

Aramid-Wabe 29 kg/m³

Stützstoff für leichte Sandwich-konstruktionen

Beschreibung

- hohe Schlag-, Vibrations- und Ermüdungsbeständigkeit
- extreme Druckfestigkeit
- sehr gute Chemikalienbeständigkeit

Aramid-Waben sind nichtmetallische, leichtgewichtige Waben aus Nomex®-Papier (Kevlar®-Papier), die mit hitzebeständigem Phenolharz, entsprechend den strengen Anforderungen der Luftfahrt, beschichtet sind.

Die Verbindung von Aramidfasern und Phenolharz verleiht der Wabe ihre herausragenden Eigenschaften.

Die hexagonalen (sechseckigen) Zellen garantieren eine optimale Festigkeit und Steifigkeit sowohl bei flachen, als auch bei bearbeiteten Sandwichstrukturen. Die Verformbarkeit in dünner Stärke von z.B. 2 - 3 mm ist gut.

Temperaturbeständigkeit

Die Wärmebeständigkeit von R&G Aramid-Waben ist besser, als in den Spezifikationen der Luftfahrtindustrie verlangt wird.

Bei 135 °C beträgt die Verringerung der Druck- und Schubfestigkeit ca. 15 %, während der Verlust an Druckfestigkeit bei 180 °C unter 25 % des Anfangswertes liegt.

Brandverhalten

Aramid-Waben verfügen über eine **ausgeprägte Feuchtigkeits- und Hitzebeständigkeit** und sind als **schwer entflammbar/selbstverlöschend** eingestuft.

Im Brandfall erzeugen sie sehr geringe Mengen an Rauch und nahezu keine toxischen Substanzen. Die Rauchdichten nach der ATS 1000.001 sind sehr niedrig im Vergleich zu der Luftfahrt-Forderung.

Chemikalienbeständigkeit

Die Chemikalienbeständigkeit der Aramid-Waben gegen Flüssigkeiten, die beim Flugzeugbau gebräuchlich sind, ist erwiesen. Der Abfall der Festigkeit nach 144 Stunden Tauchbelastung bei Raumtemperatur in Motoröl, hydraulischem Öl oder destilliertem Wasser ist kleiner 10 %.

Elektrische Eigenschaften

Bei 9375 MHz ist die dielektrische Widerstandszahl 1,10 (+/- 5 %). Die Toleranz der dielektrischen Zahl gibt die Abhängigkeit der Raumdichte und der Polarisation bei 0° Anfallwinkel an.

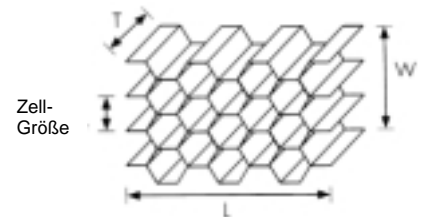
Produktreihe

Prinzipiell sind verschiedene Dichten von 29 - 144 kg/m³ lieferbar. Standardmäßig **ab Lager** verfügbar ist die Type **29 kg/m³** in den Dicken **2, 3 und 5 mm**.

Als Sonderanfertigung sind Dicken bis 914 mm möglich

Toleranzen und Größen

Zellgröße	± 10 % der Nominalgröße
Raumgewicht	± 10 % des Nominalgewichts
Länge (L)	2440 mm ± 50 mm
Breite (W)	1120 mm ± 75 mm
Dicke (T)	± 0,13 mm
Dicke (T)/Gewicht	1,5 mm (44 g/m²)
	2,0 mm (58 g/m²)
	3,0 mm (87 g/m²)
	5,0 mm (145 g/m²)



Daten

Druckfestigkeit unstabilisiert MPa	Schubfestigkeit MPa		Schubmodul MPa	
	L	W	L	W
0,6	0,45	0,3	15,0	11,0

Packungsgrößen von 1/1 Platte (2,73 m²), 1/2 Platte (1,37 m²) und 1/4 Platte (0,68 m²)
Bestell-Nummern 500 099-X, 500 100-X, 500 105-X, 500 110-X