

# Besonderer Kastensandwich für die gewichtsoptimierte, innovative Aussteifung großer WKA-Rotorblätter

## Zusammenfassung

Leistungsfähige Windkraftanlagen erfordern bei gegebener Blattspitzengeschwindigkeit größere, längere Rotorblätter. Mit der Verlängerung der Rotorblätter nimmt deren Volumen mehr zu als deren Schalenoberfläche. Zusammen mit dem sich aus dem Volumenzuwachs ergebenden Potenzial für erhöhte Bauteilsteifigkeit müßten sich trotz erhöhter Flächenbelastung spezifische Gewichtsvorteile erzielen lassen. Aus der Praxis sind auf wachsende Anlagengrößen bezogen eher spezifische Übergewichte bekannt, die Betriebs- und Lebensdauerprobleme verursachen dürften und möglicherweise auch in Unsicherheiten in der Art der Aussteifung der Rotorblätter begründet sein können.

Unter dem eingetragenen Warenzeichen **PEKATEX®** wird ein einzigartiger, vorgefertigter, besonders leichter integraler Kastensandwich aus hochwertigem E-Glas

und kontrolliertem Anteil an ungesättigtem Polyester angeboten. Dank seiner Geometrie, seinem transparent gitterartigen Aufbau, der mehrlagigen verschränkten Anordnungsmöglichkeit, seinen energieabsorbierenden, dämpfenden Eigenschaften vermag dieser Kastensandwich die Blattschale im Sandwich oder durch Verrippung wie auch als Steg die Blattholme rationell, dauerhaft, umweltfreundlich, innovativ und gewichtsoptimiert auszusteiern.

Im wissenschaftlichen Meß- und Evaluierungsprogramm, über das im Windenergie-Report 2002\*) berichtet wird, sind etwa 10% der in Deutschland betriebenen Windenergieanlagen erfaßt. Nach dem Bericht sind die rund 1500 so gelisteten Anlagen durchschnittlich acht Jahre alt und größtenteils mit Rotorblättern bis etwas über 20 m Länge ausgerüstet. Konzentriert auf die Anfangsjahre mußten an fast 20% dieser Anlagen die kompletten Rotorblattsätze ausgetauscht werden. Für die wenigen im Programm enthaltenen Anlagen mit Blättern in dem Längenbereich über 30 m, die seit vier Jahren im Einsatz sind, liegen noch keine Angaben vor.

Viele Anfangsprobleme mögen inzwischen überwunden sein. Dennoch wurden allein im Jahre 2001 über 200 Reparaturen an Rotorblättern gemeldet. Nach dem Bericht sind daran die größeren Windkraftanlagen am häufigsten beteiligt. Auch wenn diese Situation vielleicht nicht für die restlichen 90% der Anlagen in Deutschland zu gelten braucht, so registrieren die Versicherer jedoch anscheinend allgemein ähnliche Schadenshäufigkeiten: Sie verlangen neuerdings umfangreiche periodische Wartungsarbeiten und verdoppeln ihre

Prämien. Auch auf der DEWEK 2002 erklärten anerkannte Branchenkenner, daß sich die Windkraftindustrie genötigt sieht, die Entwicklung größerer Windkraftanlagen in Angriff zu nehmen, obwohl die Probleme an den vorhandenen Anlagen noch nicht als bewältigt gelten können. Die Entwicklung von Rotorblättern im 40 m und im 50 m Längenbereich ist allerorten im Gange. Dabei greift die Industrie natürlich durch Eskalation und Extrapolation auf die Erfahrungen mit dem gleichwohl noch risikobeschwerten kürzeren Blättern zurück.

Ebenfalls auf der DEWEK 2002 äußerten sich verantwortliche Sachkenner in diesem Zusammenhang sinngemäß dahingehend, daß die Gewichtsabnahmen in der Entwicklung größerer Anlagen in der Praxis nicht einzuhalten seien.

## Die Entwicklung längerer Rotorblätter

Windkraftanlagen mit Nennleistungen bis über vier Megawatt werden derzeit von mehreren Unternehmen entwickelt. Höhere Nennleistungen erfordern bei vorgegebener Blattspitzengeschwindigkeit größere überdeckte Rotorflächen, also längere Rotorblätter. Verlängert man ein 20 m langes Rotorblatt auf 30, 40 oder 50 m, vergrößert sich die Schalenoberfläche des verlängerten Blattes im Verhältnis weniger, als dessen Volumen zunimmt. Obwohl sich mit zunehmender Blattgröße die Flächenbelastung und die aufzunehmenden Momente erhöhen, würde man doch auch wegen der mit dem größeren Volumen verbundenen größeren Querschnitte und dem damit gegebenen Potenzial zur Erhöhung der Bauteilsteifigkeit einen auf die jeweilige Blattlänge bezogenen spezifischen Gewichtsanstieg erwarten, der

eher unter der spezifischen Oberflächenzunahme angesiedelt ist.

In der Praxis scheint das bisher jedoch kaum erreicht zu werden. Vielleicht wird den bewußten Unsicherheiten mit entsprechenden Sicherheitszuschlägen begegnet. Hinzu kommen ggfs. gewichtserhöhende Eigenheiten der Konstruktion, z.B. im Flanschbereich, wo Ausgleichsmaßnahmen dafür erforderlich sind, daß etwa die Hälfte der zur Lastab- und Lastübertragung positionierten Faserstränge „herausgebohrt“ werden. Die schwierige Qualitätssicherung etwa beim „verdeckten“ Verbund der Deckschichtlamine bei den Sandwichanteilen mag zu weiteren Sicherheitszuschlägen führen. Denkt man in Glas, sind die Harzanteile nicht zu übersehen. Bei dem überwiegend geübten Handauflegeverfahren betragen sie bis über 50 Gewichtsprozent.

Natürlich befrachten relativ hohe Blattgewichte sekundär wie dargelegt die Blattanbindung im Flansch, aber auch die Nabe, den Antriebsstrang, das Gondelgewicht und so weiter. Übergewicht dürfte jedenfalls kaum zu größerer Betriebssicherheit oder zu längerer Lebensdauer der WKA führen.

Fazit: Zuviel Gewicht kostet zuviel Geld.

\*) Windenergie Report Deutschland 2002, Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel, 2002

## Ein besonderer Kastensandwich für die Blattaussteifung

Die im folgenden beschriebenen Eigenschaften, Untersuchungen und Überlegungen beziehen sich auf einen einzigartigen, vorgefertigten, integralen Kastensandwich, der unter dem eingetragenen Warenzeichen **PEKATEX®** auf dem Markt ist. Der nämliche Kastensandwich beinhaltet bereits die Abstandstruktur und beidseitige Deckschichten. Der beschriebene Kastensandwich ist ein homogener Sandwich, ganz aus glasfaserverstärktem Kunststoff zur gewichtssparenden direkten Beulaussteifung der Schale des Rotorblattes sowie in Stegform zur Beulfeldbegrenzung (Rippen) und zur Abstandsaussteifung der Rotorblattholme. Das Volumengewicht des nämlichen Kastensandwich beträgt  $40 \text{ kg/m}^3$ , sein Harzanteil maximal 40 Gewichtsprozent. Leistungsdaten für eine ausgesuchte Type siehe Tab. 1–3. In der Praxis qualifiziert sich der besagte Kastensandwich zur gewichtsoptimierenden Aussteifung der Rotorblätter durch eine Vielzahl einzigartiger Eigenschaften:

- Der besondere Kastensandwich besteht aus UP-Harz und hochwertigen Fasern aus E-Glas. Ungesättigtes Polyesterharz geht mit aufflaminierten Epoxidharzen einen reaktiven, innigen Verbund ein.
- Der beschriebene Kastensandwich macht Arbeitsabläufe überschaubar. In seine gitterartig offene Struktur können Laminatharze eindringen, reaktiv verkleben und sich zugleich mechanisch verkrallen. Dabei lassen sich zum Beispiel mit aufschäumenden Epoxidverbundharzen sowohl die Beulaussteifung der Schale als auch die Steganbindung zu den Holmen bezüglich des Gewichts wie auch der mechanischen Eigenschaften

optimieren (siehe Abb. 1). Der nämliche Kastensandwich ist bis mindestens  $140^\circ \text{ C}$  temperaturbeständig.

- Hin zur fachwerkartigen Aussteifung: Struktur, Aufbau und Geometrie des beschriebenen Kastensandwich erweitern die konstruktiven Möglichkeiten. Zwar könnten auf diesen besonderen Kastensandwich auch zusätzliche Deckschichten – auflaminiert oder aufgeklebt – aufgebracht werden. Davor sollte aber stets die Analyse stehen, ob es bei dem geringen Volumengewicht und dem niedrigen Harzanteil nicht technisch und wirtschaftlich vorteilhafter ist, den beschriebenen Kastensandwich in seiner Grundform mehrlagig einzusetzen. Der besagte Kastensandwich kann dabei bedarfsgerecht verschränkt und fachwerkartig angeordnet werden, so daß die gegebene  $0^\circ/90^\circ$  Faserausrichtung den Kraftflüssen entsprechend variabel ausgerichtet und kombiniert werden. Der Schalenkrümmung und den Lastgegebenheiten läßt sich der beschriebene Kastensandwich durch Schachbrettverlegung – einlagig oder mehrlagig – anpassen. Alternativ zur Sandwicheussteifung der Schale kann die Aussteifung auch durch Verrippung mit Skelettprofilen, die in Material und Struktur dem Kastensandwich entsprechen, erfolgen (siehe Abb. 2–4).
- Mit diesem Kastensandwich ist Transparenz angesagt: Er ist „einsehbar“ und jede Verbindung mit ihm ebenso. Diese Transparenz erleichtert die Qualitätssicherung beim Arbeiten zur Versteifung der Schale wie bei der Herstellung der Stege und Rippen mit ihrer Anbindung. Im übrigen ist der beschriebene Kastensandwich „durchlüftet“ und verhindert so jegliches Einnisten von Kondensat.

- Ausgezeichnetes Dämpfungsverhalten: Der beschriebene Kastensandwich hat auf Grund seiner gitterartigen Struktur ein großes Energieabsorptionsvermögen und wirkt dadurch dem Auftreten kritischer Schwingungszustände wesentlich entgegen.
- Herausragende Dauerfestigkeit: In dynamischen Prüfungen an hochbelasteten zwei Meter hohen Stützstegen aus dem beschriebenen Kastensandwich in einlagiger Konfiguration wurden seine Dauerstandfestigkeit eindrucksvoll nachgewiesen. In dieser Prüfung werden in den Stützstegen Schubverformungen in der Größenordnung simuliert, wie sie angeblich maximal für das Auftreten sogenannter Jahrhundertböen angesetzt und zugelassen werden. Bisher wurden über fünf Mio. Lastwechsel schadlos überstanden.

Zur rasanten Entwicklung immer größerer Rotorblätter bietet der beschriebene Kastensandwich den notwendigen Löungsansatz, Rotorblätter leicht, rationell, dauerhaft und umweltfreundlich zu bauen. Dabei wird es darauf ankommen, dem Rotorblatt entwickelnden Unternehmen bei gegebener aerodynamischer Schalengeometrie und Holmkonstruktion das zur Aussteifung mit diesem Kastensandwich erforderliche konstruktive und fabrikatorische Know-how so zu vermitteln, und mit ihm so zertifikationsgerecht anzupassen, daß die Vorteile dieser Technologie ihm und seinen Kunden möglichst umfassend zugute kommen.

**PEKATEX® Typ RE/RO 30**  
Strukturkennwerte

Abb. 1

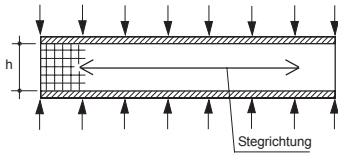
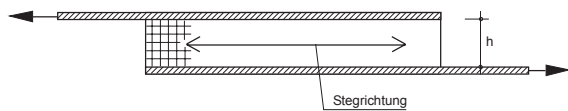
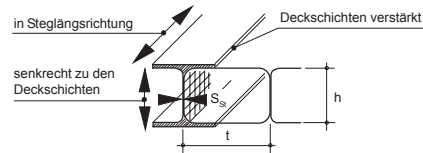


Abb. 2



zu Abb. 1 u. 2



Gewicht ± 10%	G	kg/m <sup>2</sup>	1,20
Steghöhe	h	mm	30
Stegteilung	t	mm	64
Stegdicke	S <sub>St</sub>	mm	1,63
Steglänge je m <sup>2</sup>	m		16
<b>Steg senkrecht zu den Deckschichten gemäß Abb. 1</b>			
<b>Druck</b>			
- Bruchspannung	N/mm <sup>2</sup>		7,5
- Bruchstauchung	% der Steghöhe		2,0
- Modul	N/mm <sup>2</sup>		376
- Bruchlast	N je mm Steglänge		12,2
	N je 16 m Steglänge		195.200
<b>Steg über die Deckschichten in Steglängsrichtung gemäß Abb. 2</b>			
<b>Schub</b>			
- Bruchspannung	N/mm <sup>2</sup>		4,4
- Bruchschiebung	% der Steghöhe		4,1
- Modul	N/mm <sup>2</sup>		106
- Bruchlast	N je mm Steglänge		7,1
	N je 16 m Steglänge		113.600

Tabelle 1

**PEKATEX® Typ RE/RO 30**  
Produktkennwerte

Abb. 1

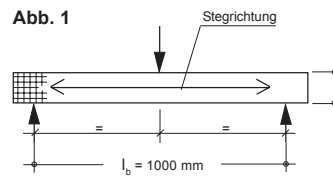
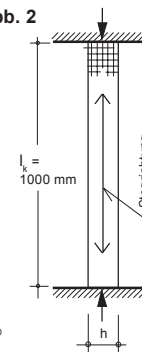
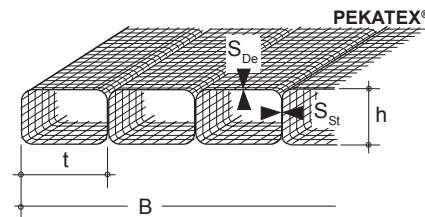


Abb. 2



zu Abb. 1 u. 2



Gewicht ± 10%	G	kg/m <sup>2</sup>	1,20
Steghöhe	h	mm	30
Stegteilung	t	mm	64
Stegdicke	S <sub>St</sub>	mm	1,63
Deckschichtdicke	S <sub>De</sub>	mm	0,66
Stege je m Breite	B	Stück	16
<b>Prüfbedingungen gemäß Abb. 1</b>			
<b>Biegung</b>			
- Bruchspannung	N/mm <sup>2</sup>		5,03
- Durchbiegung unter Bruchlast	mm		11,5
- Modul	N/mm <sup>2</sup>		2.431
- Bruchlast	N je 2 Stege (ein Kanal)		45,5
	N je 16 Stege		364
<b>Prüfbedingungen gemäß Abb. 2</b>			
<b>Knicken, Beulen, Knittern</b>			
- Bruchspannung	N/mm <sup>2</sup>		3,99
- Stauchung unter Bruchlast	mm		2,3
- Modul	N/mm <sup>2</sup>		1.735
- Bruchlast	N je 2 Stege (ein Kanal)		896
	N je 16 Stege		7.168

Tabelle 2

**PEKATEX® Typ RE/RO 30**  
Produktkennwerte

PEKATEX® Strukturschnitt 90° zur Steg-, Kanalrichtung

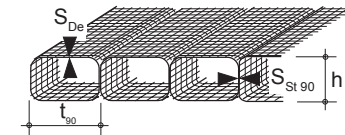


Abb. 1

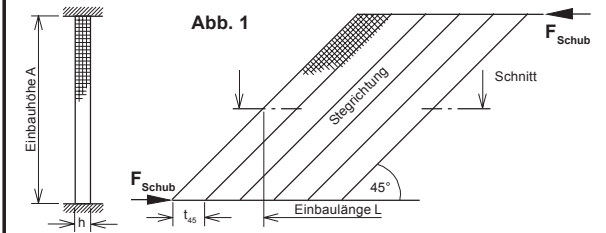
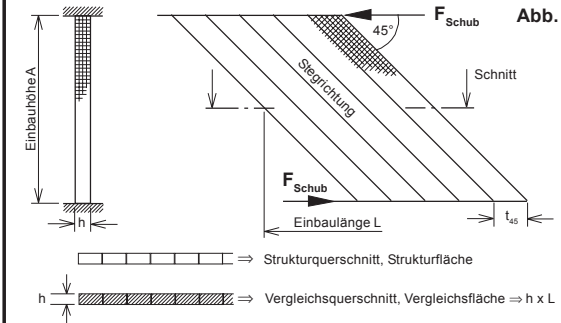
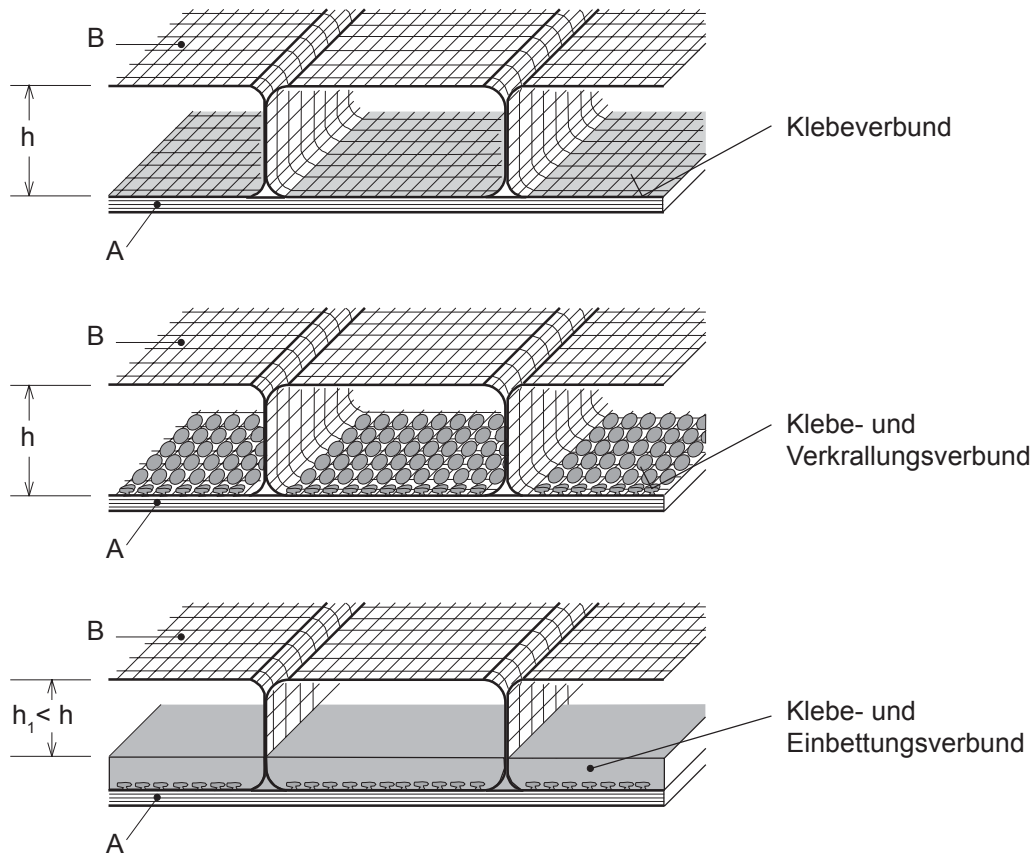


Abb. 2



Gewicht ± 10%	G	kg/m <sup>2</sup>	1,20
Plattendicke/Steghöhe	h	mm	30
Deckschichtdicke	S <sub>De</sub>	mm	0,66
Stegteilung	t <sub>90</sub>	mm	64
Stegdicke	S <sub>St90</sub>	mm	1,63
Stegteilung	t <sub>45</sub>	mm	90,5
Stegdicke	S <sub>St45</sub>	mm	2,31
<b>Prüfbedingungen gemäß Abb. 1 (Druckbelastung dominant)</b>			
<b>Schub</b>			
- Bruchspannung	N/mm <sup>2</sup> Strukturfläche		1,54
	N/mm <sup>2</sup> Vergleichsfläche		(0,11)
- Bruchschiebung	% der Einbauhöhe A		0,73
- Modul	N/mm <sup>2</sup> Strukturfläche		211
	N/mm <sup>2</sup> Vergleichsfläche		(15)
- Bruchlast	N je PEKATEX®-Kanal		304
	N je 1 m Einbaulänge L		3.359
<b>Prüfbedingungen gemäß Abb. 2 (Zugbelastung dominant)</b>			
<b>Schub</b>			
- Bruchspannung	N/mm <sup>2</sup> Strukturfläche		33,65
	N/mm <sup>2</sup> Vergleichsfläche		(2,43)
- Bruchschiebung	% der Einbauhöhe A		10,7
- Modul	N/mm <sup>2</sup> Strukturfläche		315
	N/mm <sup>2</sup> Vergleichsfläche		(23)
- Bruchlast	N je PEKATEX®-Kanal		6.632
	N je 1 m Einbaulänge L		73.282

Tabelle 3



A ⇒ Schalenlaminat  
 B ⇒ PEKATEX®-Kastensandwich

h bzw.  $h_1$  ⇒ wirksame Höhe des Sandwich-Schubsteiges

Abb. 1: Beulaussteifung der Rotorblattschale mittels PEKATEX®-Kastensandwich hier: Verbundvarianten

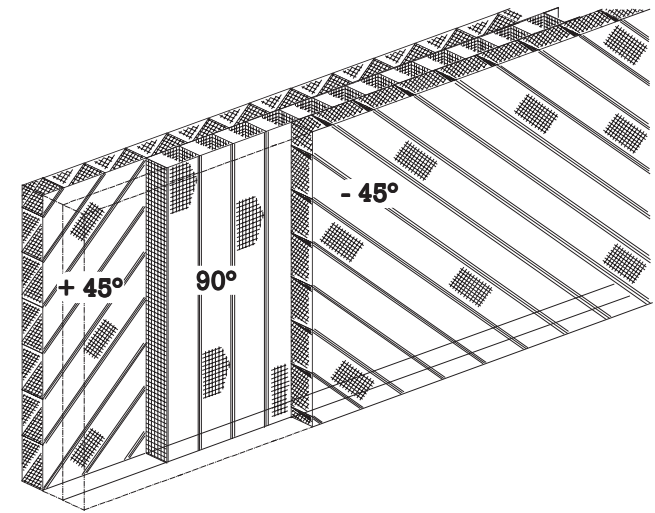


Abb. 2: PEKATEX®-Schubsteg zur Abstandsaussteifung der Rotorblattholme hier: 3-Lagenkonfiguration



Abb. 3: Schubprüfung an einer zweilagigen  $\pm 45^\circ$  PEKATEX®-Stegkonfiguration

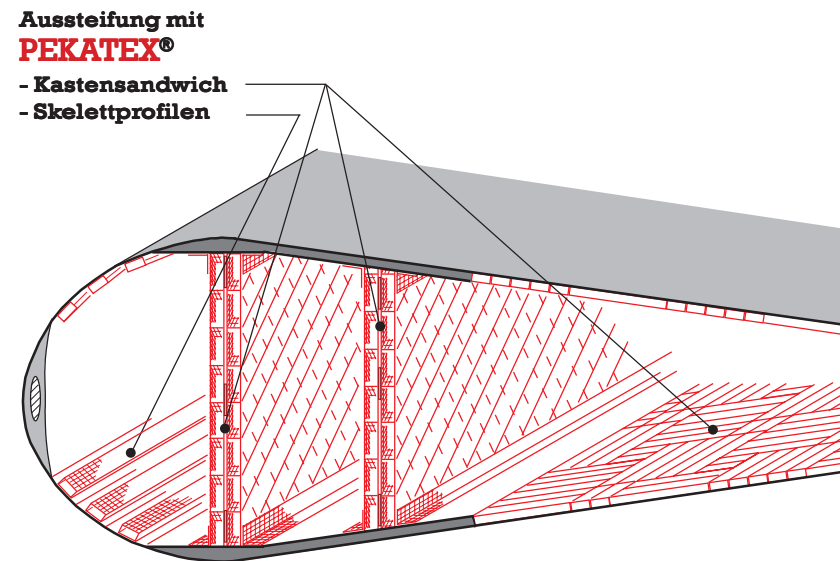


Abb. 4: Blattaussteifung zwischen den Holmen und Beulaussteifung der Schale mittels PEKATEX®-Kastensandwich bzw. Skelettprofilen