

**Ingenieurmäßige Arbeit**  
*Entwicklung eines Frontends für  
das Fahrzeug Lotus Elise  
in Wabensandwichbauweise*

Sommersemester 2008



von:  
Axel Oester

betreut durch:  
Prof. Dr.-Ing. Herbert Funke

## Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung .....	3
1.1	Herstellung bei Lotus .....	3
1.2	Das Projekt .....	5
2	Planung des Prototyps .....	6
2.1	Analyse des Originalteils .....	6
2.2	Planung des Laminats.....	8
2.3	Bauteilberechnung und Vergleich.....	9
2.4	Benötigtes Material .....	11
3	Herstellung des Prototyps.....	12
3.1	Vorbereitung.....	12
3.2	Arbeitsschritte .....	13
3.3	Laminierplan .....	19
4	Umsetzung und praktische Erkenntnisse.....	23
5	Ergebnis.....	24
6	Anhang .....	26
6.1	Literatur.....	26
6.2	Software .....	26

# 1 Einleitung

Im Rahmen dieses Projekts soll das Frontend eines Sportwagens zur Gewichtsersparnis in Waben sandwichbauweise hergestellt werden. Als Versuchsobjekt steht ein Lotus Elise zur Verfügung. Eine Form des Frontends wird von der Firma British Sports Cars aus Essen zur Verfügung gestellt. Es handelt sich hierbei um eine leicht im Design modifizierte Variante für den Motorsport.

Die Lotus Elise bietet sich für einen solchen Versuch an, da hier schon zahlreiche Maßnahmen zur Gewichtsreduzierung erfolgreich ergriffen wurden. Die Bodenkonstruktion besteht aus geklebt und geschraubten Aluminium, die Crashbox aus getemperter Kohlefaser und die Außenhaut aus Glasfaserlaminat. Damit wird ein Eigengewicht von ca. 700 kg erreicht, welches schon mit der Basis Motorvariante mit 122 PS enorme Fahrleistungen ermöglicht. Eine weitere Gewichtsreduktion erschien deshalb besonders reizvoll.

Das Original Frontend hat ein Eigengewicht von ca. 12,5 kg. Ziel ist es dieses auf ca. 5-6 kg zu reduzieren, ohne dabei die Stabilität negativ zu beeinflussen.

Bewerkstelligt werden soll dies durch ein hochfestes Laminat mit Wabenkern, wie es schon bei Flugzeugen Verwendung findet.

Durchgeführt werden soll das Projekt im Labor der Fachhochschule Dortmund in Zusammenarbeit mit den Firmen MeFo SCS in Hagen und British Sports Cars Essen.

## 1.1 Herstellung bei Lotus

Die Karosserie der Elise besteht komplett aus Faserverbundwerkstoffen. Die Außenhaut hat keinerlei tragende oder versteifende Funktion, außer die Windkräfte aufzunehmen. Die einzelnen Teile sind entweder mit einem elastomeren Polyetherankleber mit dem Aluminiumrahmen verklebt oder, wie z.B. das Front- und Heckteil, mit dem Rahmen verschraubt, um eine einfache und schnelle Demontage und damit einfachen Zugang zu Motor und Rahmen zu gewährleisten.

Der Grossteil der Karosserieteile wie Hauben, Türen und Schweller werden im „VARI“-Verfahren (Vacuum Assisted Resin Injection) unter Verwendung eines „LOW PROFILE“-Harzes produziert und haben eine Stärke von ca. 2 mm. Hierbei werden zweischalige Edelstahlformen verwendet. Die Form der Außenansicht des Bauteils wird mit einem Gel Coat, eine Art Füller zur Verbesserung der Oberflächenqualität behandelt. Danach werden die vorgeschneittenen Glasfasermatten eingelegt und der zweite Teil der Form montiert. Im verbleibenden Hohlraum wird nun Unterdruck erzeugt und das Harz eingespritzt.

Das System wurde 1972 für den Lotus Elite entwickelt.

Der Windschutzscheibenrahmen ist zur Erhöhung der Festigkeit ausgeschäumt und ist zusammen mit dem vor Kopf des Rahmens montierten länglichen „Crashbox“ verantwortlich für das Crashverhalten und absorbiert im Falle eines Unfalls die Energie durch Versagen.

Die für das Crashverhalten wichtigen Teile werden in dem teureren „high-pressure resin transfer moulding“ (RTM) Verfahren hergestellt. Hier werden durch extrem hohe Drücke

Faservolumenanteile von über 60% erreicht. Die Aushärtung erfolgt unter hohen Temperaturen.

Nachbehandlungen der GFK Bauteile erfolgt durch Wasserstrahlschneiden.

Das Frontteil der Elise besteht aus der Nase und den beiden Frontkotflügeln. Aufgrund der komplizierten Form wird die Front von Hand laminiert. Dabei werden die vorher nach Schablone geschnittenen Glasfasermatten mit Harz durchtränkt und in die Edelstahlform gegeben. Luftblasen werden von Hand mit Rollen und Pinseln ausgestrichen.

Die Materialien für die Karosserie der Elise werden von der Firma Gurit-Essex hergestellt.

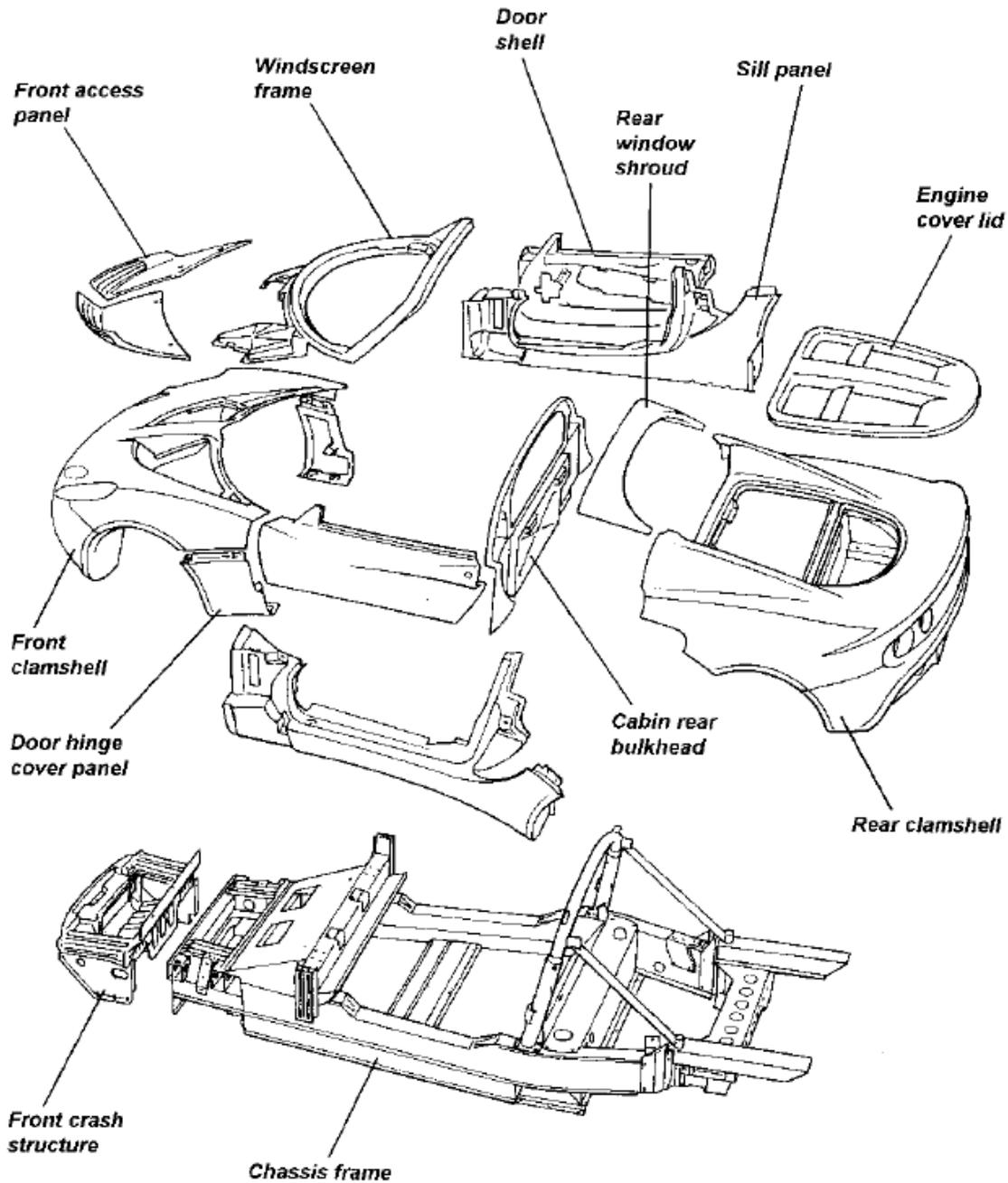


Bild 1.1

## 1.2 Das Projekt

Ziel der Ingenieurmäßigen Arbeit ist es, das Gewicht des Frontends zu reduzieren, ohne dabei Verluste bei der Biegesteifigkeit und Festigkeit in Kauf zu nehmen. Dazu wird zuerst das Originalteil analysiert um die mechanischen Eigenschaften abzuschätzen. Diese Erkenntnisse dienen dann zur Dimensionierung des neuen Laminats in Wabensandwichbauweise. Zur Analyse und Planung dient unter anderen die Software LamiCens<sup>©</sup>. LamiCens<sup>©</sup> ermöglicht die Berechnung verschiedener Kennwerte unterschiedlichster Lamine. So können z.B. verschiedenen Gewebe und Gelege, unterschiedliche Matrix, die Anzahl und Ausrichtung der Schichten und das Faservolumen berücksichtigt werden.

Manche Werte müssen geschätzt oder angenommen werden, wie zum Beispiel die mechanischen Eigenschaften der originalen Harz-Härter-Kombination, da diese nicht bekannt sind. In diesem Fall greifen wir auf bekannte Werte zurück, wobei im Zweifelsfall höhere Qualitäten angenommen werden.

Als besondere Herausforderung ist neben der Planung die praktische Ausführung. Aufgrund der komplexen Form und der Größe der Formteile scheint mindestens eine weitere Person als praktische Hilfe unerlässlich.

Ausgeführt wird das Projekt im fahrzeugtechnischen Labor der Fachhochschule. Zur Verfügung stehen dort Werkzeuge zur Vor- und Nachbereitung von Form- und Bauteilen sowie die Benötigten Vakuumpumpen.

## 2 Planung des Prototyps

Als Grundlage für die Planung des Bauteils dienen an diesen Punkt die Eigenschaften des Originalbauteils. Dies erspart komplexe Berechnungen und Versuche, die einer Neukonstruktion gleichkämen. Da sich das Fahrzeug als solches nicht ändert bleibt auch die Beanspruchung des Frontends die gleiche. Ziel ist es also, ein Bauteil herzustellen, das mindestens die mechanischen Eigenschaften des Originalbauteils erfüllt, bzw. übertrifft.

### 2.1 Analyse des Originalteils

#### 2.1.1 Größe und Beschaffenheit des Originalbauteils

Das Gewicht des Originalbauteils (Bild 2.1) beträgt ca. 12,5 kg bei einer durchschnittlichen Materialstärke von 3-4 mm. Bei dem Material handelt es sich um mehrere Lagen grobes Glasfaservlies der von Hand in die Form laminiert wurde. Davon ausgehend können wir folgenden Parameter annehmen:

Der geschätzte Faservolumenanteil liegt bei ca. 20%. Dieser Wert ist typisch für handlaminierte Glasfaservliese. Zum Erreichen der Materialstärke waren wahrscheinlich 4 Lagen Glassmatte mit  $450\text{g/m}^2$  von Nöten.

Als Matrix wurde ein Polyesterharz verwendet. Leider ist nichts über die Eigenschaften bekannt. Daher gehen wir von einem Epoxydharz aus, dessen mechanische Eigenschaften die der Polyestermatrix bei weitem übertreffen.

Diese Werte lassen sich mit LamiCens<sup>©</sup> simulieren.



Bild 2.1

Bei der Analyse mit LamiCens<sup>©</sup> ergaben sich folgende Werte:

<b>Produktionsspezifische Kennwerte:</b>	
Laminatgewicht:	4991.4 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Fasergewicht:	1795.2 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Harzverbrauch:	3196.2 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Dicke:	3.52 mm
Laminat-Faservolumenanteil:	20.0%

<b>Kostenkennwerte:</b>	
Laminat-Werkstoffkosten:	34.65 €/m <sup>2</sup>
Faserhalbzeugkosten:	9.74 €/m <sup>2</sup>
Matrixkosten:	24.91 €/m <sup>2</sup>

<b>Winkel</b>	<b>E-Modul</b>	<b>Schubmodul</b>	<b>Querdehnzahl</b>
0°	8681	3287	0.321

Aufgrund des sich hier ergebenden Laminatgewichts beträgt die Fläche des Frontends ca. 2.6 m<sup>2</sup>.

## 2.2 Planung des Laminats

Grundlage zur Auswahl der Gewebestärken und des Laminataufbaus sind hier erst einmal positive Eigenschaften in der Verarbeitung und zu erwartende Qualitätseindrücke. Das Material wird bezogen von der R&G GmbH.

### 2.2.1 Geplanter Laminataufbau

Gewebe 163g Faserausrichtung 0°

Gewebe 163g Faserausrichtung 30°

Gewebe 163g Faserausrichtung 60°

Wabenkern 3mm / 87 g

Gewebe 163g Faserausrichtung 0°

Gewebe 163g Faserausrichtung 45°

Der zu erwartende Faservolumenanteil liegt aufgrund der Verarbeitungsweise und dem Einsatz von Vakuum bei ca. 38%. Daraus ergeben sich folgende mechanischen Eigenschaften:

Äusseres Laminat

<b>Produktionsspezifische Kennwerte:</b>	
Laminatgewicht:	827,5 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Fasergewicht:	479,4 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Harzverbrauch:	348,1 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Dicke:	0,49 mm
Laminat-Faservolumenanteil:	38,0%
<b>Kostenkennwerte:</b>	
Laminat-Werkstoffkosten:	12,55 €/m <sup>2</sup>
Faserhalbzeugkosten:	9,84 €/m <sup>2</sup>
Matrixkosten:	2,71 €/m <sup>2</sup>

E-Modul

Winkel	E-Modul	Schubmodul	Querdehnzahl
0°	14246	5410	0,311

Inneres Laminat:

<b>Produktionsspezifische Kennwerte:</b>	
Laminatgewicht:	551,7 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Fasergewicht:	319,6 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Harzverbrauch:	232,1 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Dicke:	0,33 mm
Laminat-Faservolumenanteil:	38,0%
<b>Kostenkennwerte:</b>	

Laminat-Werkstoffkosten:	8,37 €/m <sup>2</sup>
Faserhalbzeugkosten:	6,56 €/m <sup>2</sup>
Matrixkosten:	1,81 €/m <sup>2</sup>

E-Modul:

Winkel	E-Modul	Schubmodul	Querdehnzahl
0°	14283	5410	0,312

Verwendete Matrix:

Epoxydharz L1000 und Härter EPH 294

Dabei handelt es sich um einen langsamen Härter für große Bauteile. Die Harz-Härter-Kombination ist dünnflüssig und erreicht eine hohe statische und dynamische Festigkeit. Es besteht eine GL Zulassung für Windkraftflügel.

Weiter technische Daten:

- Mischungsverhältnis 100 : 30
- Topfzeit bei 100g-Ansatz bei 20°C: 500-600 Min.
- Härtung 24h bei Raumtemperatur 15h bei min. 60°C
- Wärmebelastbarkeit ca. 90°C

Bei dem Wabenkern handelt es sich um eine Aramid-Wabe mit hoher Schlag-, Vibrations- und Ermüdungsbeständigkeit, extremer Druckfestigkeit und sehr guter Beständigkeit gegen Chemikalien. Der Zellendurchmesser beträgt 3,2mm.

Das verwendete Glasfasergewebe entspricht der Luftfahrtnorm.

## 2.3 Bauteilberechnung und Vergleich

### 2.3.1 Berechnung Beulsteifigkeitsnachweiß

Eine geeignete Weise die mechanischen Qualitäten der Lamine zu vergleichen ist die Betrachtung der Beulkritischen Spannung. Sie beschreibt den maximalen Druck pro Fläche den der Werkstoff standhalten kann ohne zu versagen.

Formel für die beulkritische Spannung  $\sigma$  bei Druckbelastung:

$$\sigma = k \times E_w \left( \frac{s}{b} \right)^2 \quad \text{für die massive Platte} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \kappa \times k \times E_w \left( \frac{d}{b} \right)^2 \quad \text{für die Sandwichplatte} \quad (2.2)$$

Indizes:

- $s/b$  = Laminatstärke / kurze Seite des zu betrachtenden Feldes
- $k$  = Beulfaktor nach Tabelle [Hertel Leichtbau, 1980]
- $E_w$  = wirksames E-Modul
- $\kappa$  = Steifigkeitserhöhungsfaktor [Hertel, 1980]
- $d$  = mittlere Sandwichdicke

Um die beiden Lamine zu vergleichen wähle ich einen gemeinsamen Beulfaktor  $k = 1$  und  $b = 10$  mm.

***Dies sind keine Absolutwerte!***

Sie dienen nur zum Vergleich der Lamineigenschaften.

Das wirksame E-Modul wurde für beide Lamine mit Lamicens berechnet.

### 2.3.2 Volllaminat

Da keine Erkenntnisse über die verwendete Polyester Harz/Härter Kombination vorliegen basieren die Berechnungen auf einer bekannten Standard EP Kombination, die die mechanischen Eigenschaften der originalen Polyester matrix mit Sicherheit übertrifft.

Verwendete Parameter:

$$d = 3,52 \text{ mm}$$

$$E_w = 8681 \text{ N/mm}^2$$

Daraus ergibt sich eine Beulkritische Spannung für das Originalteil von

$$\sigma = 1065 \text{ N/mm}^2$$

### 2.3.3 Wabensandwich

Verwendete Parameter:

$$S_1 = 0,51 \text{ mm (äußeres Decklaminat)}$$

$$S_2 = 0,34 \text{ mm (inneres Decklaminat)}$$

Daraus ergibt sich laut Hertel  $\kappa = 2,88$

$$d = 3,42 \text{ mm}$$

$$E_w = 13800 \text{ N/mm}^2$$

Daraus ergibt sich eine Beulkritische Spannung für das Leichtbauteil von

$$\sigma = 4640 \text{ N/mm}^2$$

### 2.3.4 Resultat

Das Laminat in Sandwichbauweise übertrifft die Festigkeit des Originalbauteils bei weitem. Die angegebenen Spannungen sind nicht als real zu betrachten und dienen nur dem Vergleich.

## 2.4 Benötigtes Material

Verwendet werden insgesamt 5 Lagen Glasgewebe  $163 \text{ g/m}^2$ , eine Lage Wabenkern  $3 \text{ mm} / 87 \text{ g}$ ,  $3 \text{ m}$  Rovings für die Radläufe und 2 Lagen Abreissgewebe + Material für die Übergänge. Hinzu kommen Harz und Härter für die Matrix bei einem zu erwarteten Faservolumenanteil von 38%.

- $13 \text{ m}^2$  Glasgewebe  $163 \text{ g/m}^2$
- $2.6 \text{ m}^2$  Wabenkern  $3 \text{ mm} / 87 \text{ g/m}^2$
- $6 \text{ m}^2$  Abreissgewebe  $95 \text{ g/m}^2$
- $3 \text{ m}$  Kohlefaser-Rovings
- $2 \text{ kg}$  Harz + Härter

Hinzu kommt der Verschnitt, der mit 30 % veranschlagt wird.

Daraus ergeben sich ungefähr:

- $17 \text{ m}^2$  Glasgewebe  $163 \text{ g/m}^2$
- $3,5 \text{ m}^2$  Wabenkern
- $8 \text{ m}^2$  Abreissgewebe
- $4 \text{ m}$  Kohlefaser-Rovings
- $3 \text{ kg}$  Harz und Härter

## 3 Herstellung des Prototyps

### 3.1 Vorbereitung

#### 3.1.1 Erstellung der Schablonen

Um später das Glasfasergewebe zuzuschneiden werden Schablonen benötigt. Aufgrund der komplexen Form ist es nicht möglich direkt Papier oder Pappe in die Form zu legen. Da feuchtes Baumwollgewebe sich ähnlich trapieren lässt wie ein getränktes Glasfasergewebe, jedoch auch formstabil beim Herausnehmen ist legen wir es in das Formteil und schneiden die Überstände mit einer Schere ab und erhalten somit die exakte Form des benötigten Glasfasergewebes (Bild 3.1). Die Form wird dann auf eine dünne Pappe übertragen um die spätere Handhabung zu erleichtern. (Bild 3.2)



Bild 3.1

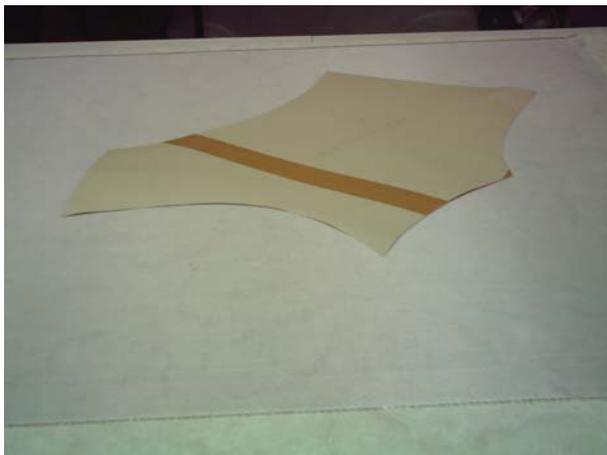


Bild 3.2

## 3.2 Arbeitsschritte

Die Lage und Ausrichtung der unter „Arbeitsschritte“ beschriebenen Materialien sind aus dem Laminierplan (3.3) zu entnehmen.

### 3.2.1 Vorbereitung der Form

- Form reinigen und mit Wachs polieren
- Glassfasergewebe, Abreissgewebe und Wabensandwich mit Schablonen nach Laminierplan zuschneiden (Bild 3.2)
- Spätere Übergänge über dem Radlauf mit zwei Schichten Klebeband absetzen (Bild 3.15)

### 3.2.2 Decklaminat

- Ecken und Kanten mit Glass Bubbles angedickten Harz ausfüllen und angleichen
- Erst zwei Schichten Abreissgewebe an den Übergängen Bauteil „B“ zu „C“ und „B“ zu „A“ anbringen
- Glassfasergewebe in der Form nach Laminierplan ausrichten und mit Harz-Härtergemisch tränken (Bild 3.15).
- Rowings in den Radlaufkanten stückweise einlegen und fest tupfen
- Rowings mit schmalen Gewebestreifen abdecken
- Zweite Schicht Gewebe in der Form platzieren und ebenfalls mit Harz- Härtergemisch tränken
- Überschüssiges Gewebe am Formrand abschneiden (Bild 3.3)
- Abschließende Lage Abreissgewebe anbringen (Bild 3.4)
- Form in Vakuumsack platzieren
- Vakuumsack abdichten und überschüssige Luft absaugen (Bild 3.5, Bild 3.6)
- Vakuumpumpe anbringen
- Decklaminat 24 h aushärten lassen (Bild 3.7)



Bild 3.3



Bild 3.4

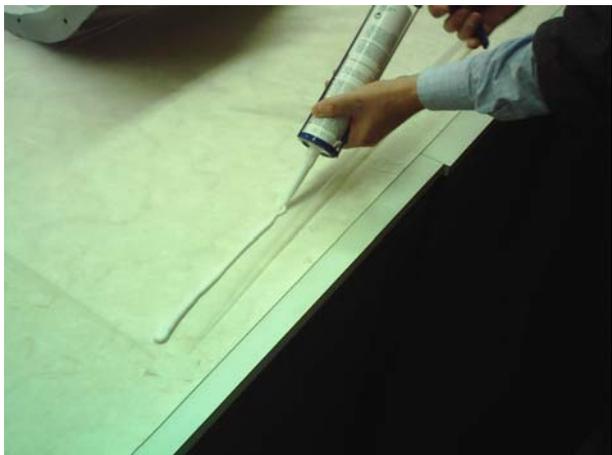


Bild 3.5



Bild 3.6



Bild 3.7

### 3.2.3 Wabensandwich

- Form aus dem Vakuumschlauch nehmen und Abreissgewebe entfernen (Nicht die Deckhaut entnehmen! Gefahr von Verunreinigungen die später im Vakuum die Oberfläche durchstoßen können) (Bild 3.8)
- verbliebene lose Matrixreste entfernen
- Überstehende Laminatreste an den Rändern abschneiden
- Zugeschnittenes Glassfasergewebe in der Form auf der Deckhaut ausrichten und mit Harz/Härter tränken
- Wabenkern im feuchten Laminat platzieren und mit Klebestreifen fixieren (Bild 3.10)
- In Vakuumsack stecken, abdichten, Pumpe anschließen und aushärten lassen



Bild 3.8



Bild 3.9



Bild 3.10

### 3.2.4 Inneres Decklaminat

- Form nach 24 Std. Aushärten aus dem Vakuumschlauch nehmen. (Bild 3.11)
- überflüssige Bereiche des Wabenkerns abschneiden und zurecht schleifen (Bild 3.12,)
- Erste Lage Glasfasergewebe auf einer Folie ausrichten und mit Harz tränken
- Getränkte Glasfaserlage mit der Folie auf dem Wabenkern legen und ausrichten, Folie dann entfernen
- Zweite Lage auflegen und mittels Rolle tränken
- Bereiche ohne Wabenkern mit mehreren Lagen Glasfasergewebe verstärken
- Abreissgewebe auflegen
- In Vakuumsack stecken, abdichten, Pumpe anschließen und aushärten lassen

**Bild 3.11****Bild 3.12**

### 3.2.5 Entformung

Nachdem die Teile ausgehärtet sind müssen sie aus den Formen entfernt werden. Dazu wird das Abreißgewebe entfernt und alle überstehenden Laminatreste abgeschnitten und beigeschliffen. Danach werden alle demontierbaren Teile der Form abgenommen. Nun sollten sich die Bauteile von Hand aus der Form lösen lassen. Bei Einsatz von Werkzeugen sind scharfe und Spitze Gegenstände zu vermeiden um eine Beschädigung von Bauteil und Form zu verhindern. Zu verwenden ist vor allem Druckluft, die zwischen Bauteil und Form eingeblasen wird.

### 3.2.6 Nachbearbeitung

Nachdem die Teile entformt sind können nun die Kanten und Übergänge in den Flächen nachgeschliffen und in Form gebracht werden. Dabei sollte ein Durchschleifen des Laminats unbedingt vermieden werden. Die verbliebenen Abreißgewebe an den Übergängen können nun auch entfernt werden (Bild 3.13).



Bild 3.13

### 3.2.7 Zusammenbau der einzelnen Teile

Um die drei Teile des Frontends formgenau zusammenzufügen müssen die drei Teile der Form zusammengebaut werden. Ist dies geschehen werden die drei bearbeiteten Bauteile wieder in die Form gelegt. Kanten oder Höhenunterschiede werden mit Glass Bubbles angedickten Harz ausgeglichen. Die Übergänge werden dann mit mehreren Lagen Glasfasergewebes zulaminiert (Bild 3.14).

Nachdem die Verbindungen ausgehärtet sind wird das Fronend entformt und der Vorgang kann von außen wiederholt werden.



Bild 3.14

### 3.3 Laminierplan

Das Frontend wird in 3 Teilen hergestellt. Dies bietet sich der Einfachheit halber an, nachdem auch die Form aus drei Teilen besteht. Die Fertigung, insbesondere der Einsatz des Vakuumsacks, würde durch die Verwendung der dreiteiligen Form als Ganzes erheblich erschwert.

A: Linker hinterer Kotflügel

B: Front

C: Rechter hinterer Kotflügel

Lage der Klebebänder und Rowings:

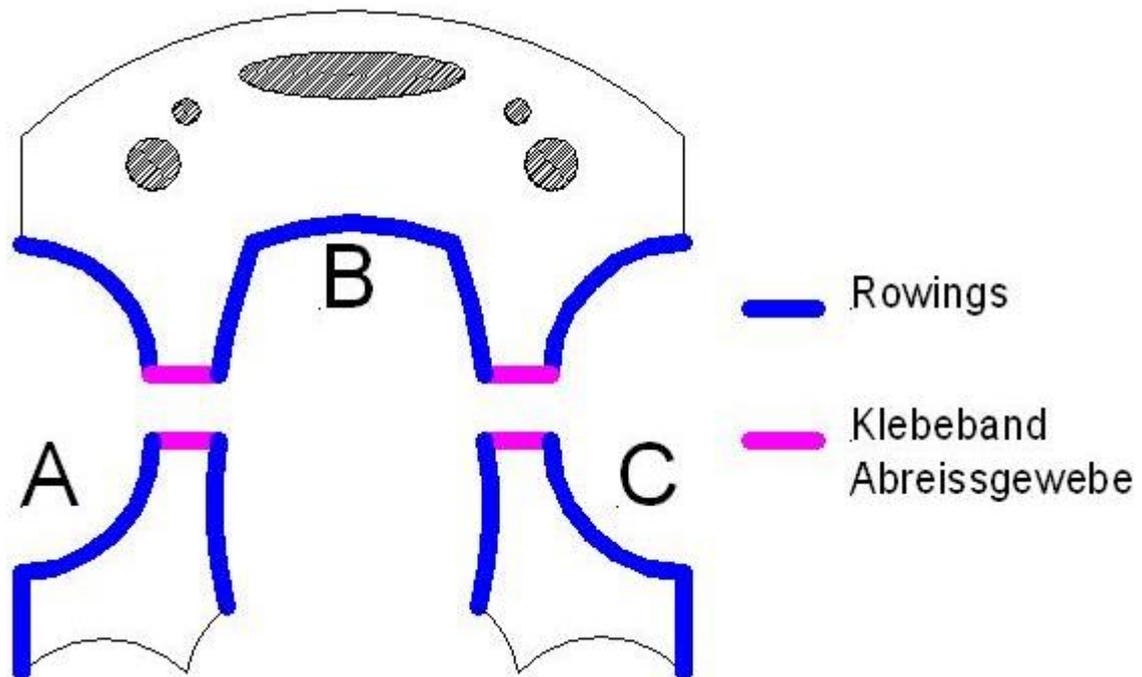


Bild 3.15

1. Lage: Faserausrichtung  $0^\circ$

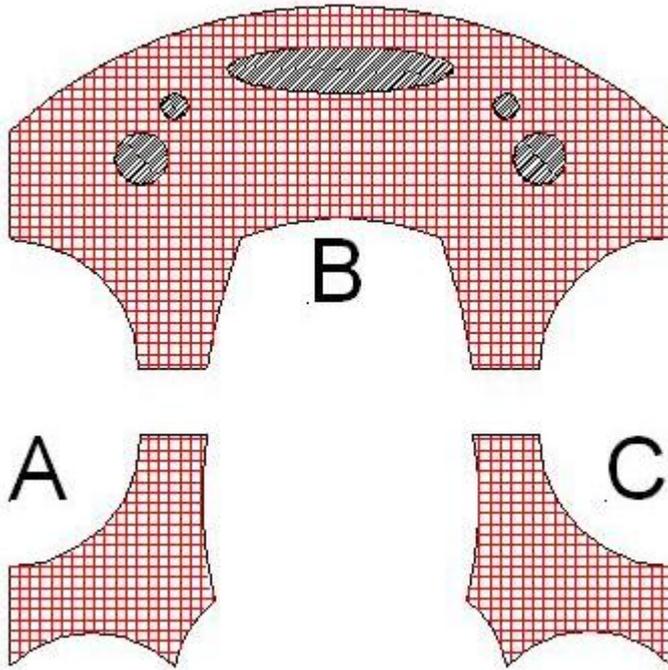


Bild 3.16

2. Lage: Faserausrichtung  $30^\circ$

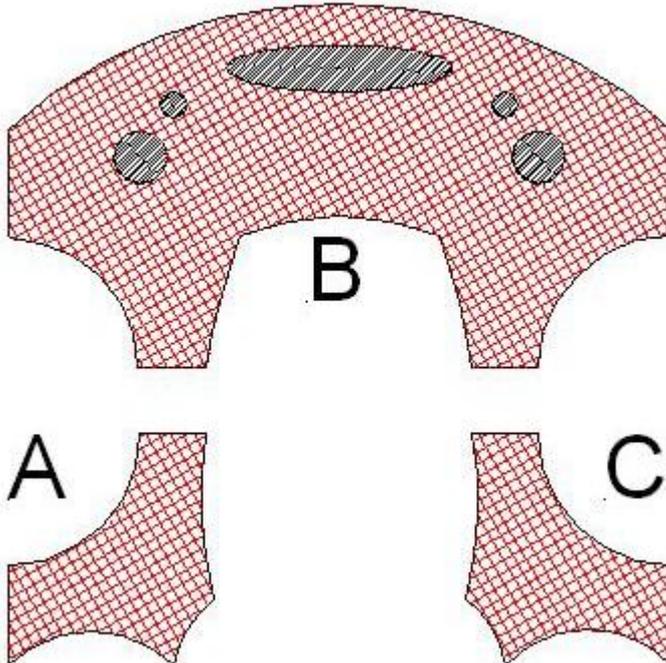


Bild 3.17

3. Lage: Faserausrichtung  $60^\circ$

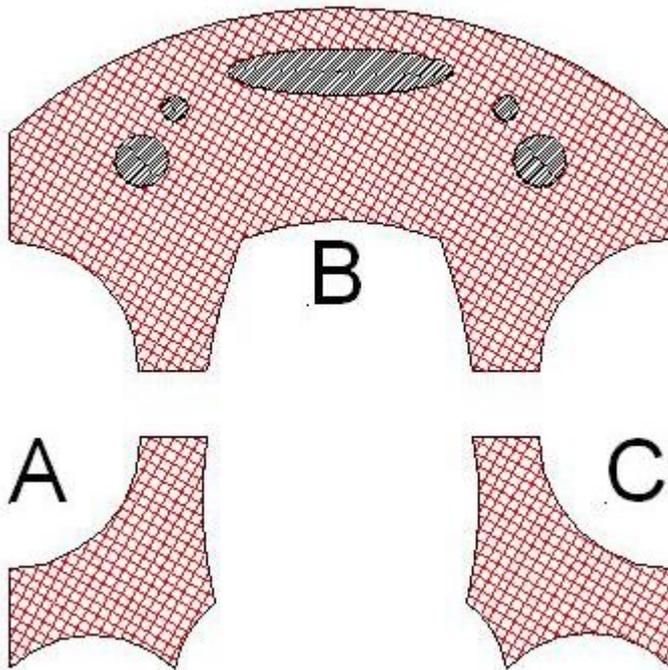


Bild 3.18

4. Lage: Wabenkern

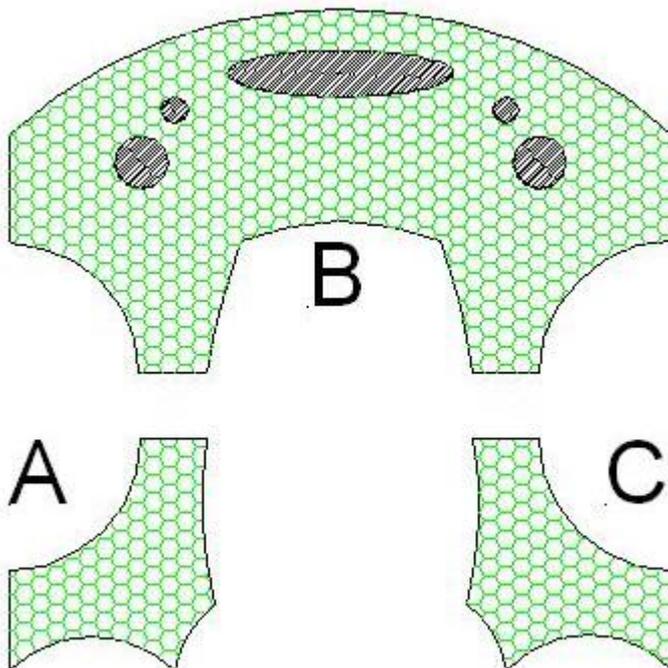


Bild 3.19

Da der Wabenkern quasihomogene Eigenschaften besitzt ist eine Ausrichtung nicht notwendig.

5. Lage: Faserausrichtung 0°

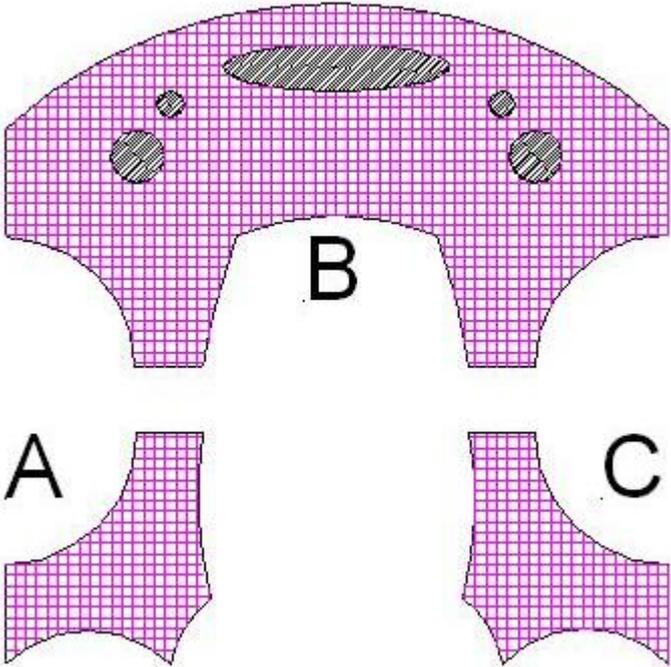


Bild 3.20

6. Lage:  
Faserausrichtung 45°

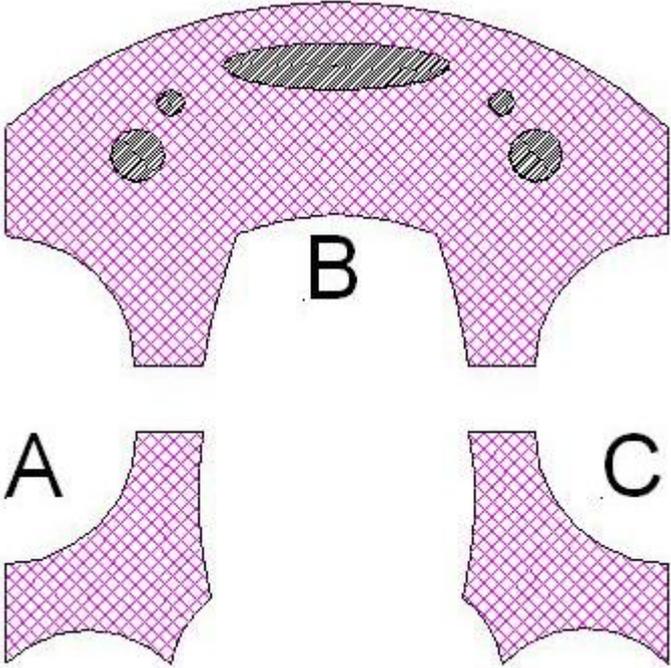


Bild 3.21

## 4 Umsetzung und praktische Erkenntnisse

Vor Beginn der eigentlichen Arbeit musste die Form leicht modifiziert werden. Da das Frontend in drei separaten Teilen gefertigt werden sollte, mussten die Radläufe der Form zertrennt werden. Um später Beschädigungen des Vakuumsacks zu vermeiden wurde die gesamte Form auf scharfe und spitze Stellen hin untersucht und überarbeitet. Überstehende Schrauben wurden abgetrennt, Muttern und Schraubenköpfe wurden mit Gewebepapier abgeklebt.

Die praktische Umsetzung des Laminierplans gestaltete sich ausgesprochen schwierig. Viele Bereiche der Form sind sehr untergriffig und komplex. Dadurch musste insbesondere bei Bauteil "B" die Größe der Glasfasergewebestücke recht klein gehalten werden um überhaupt laminieren zu können. Dies erwies sich als sehr zeitaufwendig und erschwerte die Faserausrichtung nach Laminierplan.

Die Entformung des Teilstücks B erwies sich als äußerst schwierig und konnte nicht ganz ohne Beschädigung der Form bewerkstelligt werden. Dazu wurden Holzkeile zwischen Form und Bauteil getrieben und Pressluft eingeblasen. Zusätzlich waren mehrere Helfer von Nöten. Bei wiederholter Verwendung der Form wäre eine Modifikation sehr angeraten. So könnte zum Beispiel durch Bohrungen an schwierigen Stellen der Form das Bauteil mit Pressluft „ausgeblasen“ werden.



Bild 4.1



Bild 4.2

## 5 Ergebnis

Das entstandene Bauteil erfüllt alle Erwartungen.

Die Oberflächenqualität ist hervorragend und der Stabilitäts- und Qualitätseindruck übertrifft das Originalbauteil bei weitem. Insbesondere die Verwindungssteifigkeit ist stark verbessert. Mit 5,3 kg Gesamtgewicht sind auch die Erwartungen an die Gewichtseinsparungen voll erfüllt worden.



**Bild 5.1**

Der im Vergleich zum Originalbauteil große handwerkliche Aufwand und Materialeinsatz sind durch das Ergebnis durchaus gerechtfertigt. Es ist zu erwarten, dass die Gewichtseinsparung von ca. 7 Kg dieses Bauteil für sportlich ambitionierte Lotus Besitzer äußerst interessant macht. Dadurch sollte auch eine wirtschaftliche Rentabilität gegeben sein. Es bietet sich an, auch andere Teile wie z.B. die Heckpartie der Elise in Wabensandwichbauweise herzustellen. Damit könnte eine Gesamtersparnis von mindestens 20 kg erreicht werden.



**Bild 5.2**

## 6 Anhang

### 6.1 Literatur

- Prof.Dr.-Ing. H. Funke: *Vorlesungsumdruck der Vorlesung „Karosseriekonstruktionen / Aufbauten: Faserverbundkonstruktionen für den Fahrzeugbau “ SS2005*
- Katalog 2008 der R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH Composite Technologies

### 6.2 Software

*LamiCens*: Version 0.95; Copyright 2005: Prof. Dr.-Ing. Herbert Funke in Zusammenarbeit mit R+G GmbH