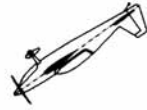


Entwicklung



eines

Kunstflug-



Modells



in
Wabensandwich-
bauweise



Studienarbeit
von
Herbert Funke

Inhalt:	Seite
1. Einleitung	4
2. Voraussetzungen	4
2.1. Kunstflug und Modellkunstflug als Wettbewerbssportart	4
2.2. Spezielle Anforderungen an Wettbewerbs- Kunstflugmodelle	6
2.3. Entwicklungsgeschichte von F3A- Modellen	7
3. Zielsetzung	9
3.1. Auswahl des Modelltyps.....	9
3.2. Besonderheiten dieser speziellen Konzeption	11
3.3. Rahmendaten	11
3.4. Anforderungsliste	13
4. Aufbau des Modells	14
4.1. Technische Daten	14
4.2. Konstruktive Maßnahmen.....	16
4.3. Modellaufbau	18
4.4. Flugmechanische Überlegungen	20
4.5. Flugmechanische Berechnungen.....	24
4.6. Festigkeitsberechnungen.....	28
5. Sandwichbauweisen	31
5.1. Das Prinzip einer Sandwichbauweise.....	31
5.2. Übliche Materialkombinationen.....	32
5.3. Werkstoffauswahl	34
6. Fertigung	38
6.1. Vakuumtechnik als Voraussetzung zur Herstellung von GfK- Wabensandwichbauteilen.....	38
6.2. Formenbau.....	41
6.3. Herstellung der Wabensandwichbauteile in Negativformen	45
6.3.1. Erstellen eines Laminierplanes.....	45
6.3.2. Laminieren der äußeren Decklage.....	46
6.3.3. Verkleben des Wabenkerns.....	48
6.3.4. Laminieren der inneren Decklage.....	50
6.3.5. Einsetzen der Einbauten.....	51
6.3.6. Verkleben der Halbschalen	52
6.4. Fertigstellung des Modells.....	55
7. Flugerprobung	57
8. Schlussfolgerungen	59
9. Literaturverzeichnis.....	60

Vorliegende Dokumentation entstand im Rahmen einer kleinen Studienarbeit im Fach Konstruktionstechnik an der Universität- Gesamthochschule Paderborn.

Ich danke Herrn M.Sc. Wenbin Yang für die Betreuung dieser Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt der Firma R&G Flüssigkunststoffe für die großzügige Unterstützung und technische Betreuung bei dieser Arbeit.

Stets einwandfreie Produkte und ausführliche technische Beratung waren hier die Basis für eine sehr gute Zusammenarbeit, welche die Anwendung neuer Werkstoffe und Fertigungstechniken im vorliegenden Rahmen erst ermöglicht hat.

Ebenso danke ich der Firma Graupner für die Unterstützung mit Fernsteuerungskomponenten.

Ein weiterer Dank gilt meinem Freund und Modellfliegerkollegen Friedhelm Bultmann für die Fotoarbeiten.

Ich versichere, diese Arbeit alleine und ohne weitere Hilfe angefertigt zu haben.

Alle verwendeten Quellen sind im Literaturverzeichnis angegeben.

Rheda-Wiedenbrück 1993



Herbert Funke

1. Einleitung

Der Einsatz neuer Werkstoffe bietet dem Anwender die Möglichkeit neue Produkte mit verbesserten Eigenschaften herzustellen. Überall dort, wo hohe Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften gestellt werden und gleichzeitig ein geringes Gewicht der Bauteile verlangt wird, gewinnen dabei Faserverbundwerkstoffe immer mehr an Bedeutung. Darüber hinaus bieten Faserverbundwerkstoffe Möglichkeiten in Formgebung und Formgestaltung wie kaum ein anderer Werkstoff. Ein relativ neuer Aspekt dieser Formgestaltungsmöglichkeiten ist die Versteifung großer Flächen mit einem Polyamid-Wabenkern.

Zwar ist das Prinzip der Sandwichbauweise mit Aluminium- Wabenkernen schon aus dem Flugzeugbau der 50 er Jahre bekannt, doch ist mit der Entwicklung der Polyamid Wabenkerne nun ein Werkstoff erhältlich, der eine besonders hohe Affinität zu den Materialien aufweist, aus denen auch Faserverbundwerkstoffe aufgebaut sind. Allerdings erfordert die Herstellung von Bauteilen in Wabensandwichbauweise schon bei deren Auslegung umfassende Kenntnisse über die Verarbeitung, die Vorzüge und auch die Grenzen eines solchen Werkstoffes.

Durch die konsequente Anwendung der Wabensandwichbauweise soll im vorliegenden Fall am Beispiel eines Kunstflugmodells aufgezeigt werden, welche Möglichkeiten eine Wabensandwichbauweise bietet.

2. Voraussetzungen

2.1. Kunstflug und Modellkunstflug als Wettbewerbssportart

Der Wettbewerbs-Modellkunstflug wie auch der Kunstflug mit Großflugzeugen versteht sich als eine Wettbewerbssportart, bei der ein Flugmodell bzw. ein Kunstflugzeug eine Folge von bestimmten Flugfiguren vollführt, das so genannte Programm. Ähnlich wie beim Kunstturnen oder dem Eiskunstlaufen wird dieses Programm von Punktwurtern nach deren subjektivem Eindruck bewertet. Jedoch wird beim Kunstflug anders als beim Kunstturnen oder Eiskunstlaufen nicht das Programm als Ganzes, sondern jede Figur für sich mit einer einzelnen Note bewertet.

Die einzelnen Kunstflugfiguren sind jeweils eine Kombination von exakt vorgeschriebenen geometrischen Flugbahnen und Drehungen um die Achsen des Flugzeuges. Einfache Flugfiguren sind zum Beispiel der Looping oder die Rolle. Beim Looping fliegt das Flugzeug einen vertikalen Kreis. Bei der Rolle dreht sich das Flugzeug um seine Längsachse, ohne dabei die Flugbahn zu verändern.

Die meisten Kunstflugfiguren, die im Wettbewerb geflogen werden müssen, sind allerdings kompliziertere Kombinationen aus solch einfachen Figuren. Kunstflugprogramme werden nach dem Aresti-Katalog zusammengestellt. In diesem Katalog sind eine Vielzahl von Flugfiguren beschrieben und in der allgemein üblichen Aresti-Symbolik beschrieben. Unabhängig vom jeweiligen Flugprogramm werden an jedes Kunstflugzeug folgende Anforderungen gestellt:

- unkritisches aber dennoch achsneutrales Flugverhalten
- gleichermaßen gute Normalflug- wie Rückenflugeigenschaften
- hoher Geschwindigkeitsbereich, d.h.: möglichst geringe Mindestfluggeschwindigkeit bei
- hoher maximaler Fluggeschwindigkeit
- geringes Leistungsgewicht, d.h.: hohe Antriebsleistung bei geringem Abfluggewicht

Diese Anforderungen gelten sowohl für bemannte Kunstflugzeuge als auch für ferngesteuerte Kunstflugmodelle.

Da wir uns im weiteren Verlauf nur noch speziell mit dem ferngesteuerten Modellkunstflug beschäftigen werden, seien hier die Gegebenheiten des Modellkunstflugsports kurz erläutert:

Modellkunstflugwettbewerbe werden im Wesentlichen in zwei Klassen ausgetragen:

Als hohe Schule des Modellkunstfluges wird allgemein die F3A-X- Klasse bezeichnet.

Diese Klasse hat es sich zum Ziel gesetzt, den manntragenden Kunstflug mit Großmodellen möglichst originalgetreu nachzuempfinden. Zum Einsatz kommen hier Großmodelle, die laut Reglement erkennbare Nachbauten manntragender Kunstflugzeuge sein müssen und eine Mindestspannweite von 2 m aufweisen. Das maximale Abfluggewicht beträgt 10 kg, ein Minimalgewicht sowie eine Begrenzung des Antriebes sind nicht vorgeschrieben.

Aufgrund der Mindestspannweite von 2 m und der vorgeschriebenen Originaltreue lag bislang jedoch das erreichbare Minimalgewicht bei über 6 kg, wobei dann eine ausreichende Motorisierung erst bei Zweitaktern ab 25 ccm Hubraum bzw. Viertaktern ab 40 ccm Hubraum gegeben war.

Am weitesten verbreitet ist die F3A- Klasse. Die wesentlichen Beschränkungen des Reglements hier sind das maximale Abfluggewicht von 5000 g sowie die Hubraumlimitierung auf 10 ccm Zweitakt-, bzw. 20 ccm Viertaktantriebe. Da Vorbildtreue hier nicht vorgeschrieben ist, sind die F3A- Modelle aerodynamisch optimierte Kunstflugmodelle, die nur entfernte Ähnlichkeiten zu manntragenden Flugzeugen aufweisen.

F3A- FAI- Programm 1992/93

- 1 Start
- 2 umgekehrte Kubanacht
- 3 Turn mit halben Rollen
- 4 langsame Rolle
- 5 halber Quadratlooping mit halber Rolle aufwärts
- 6 gerissene Rolle 45° abwärts
- 7 Humpty-Bump variabel
- 8 Vierpunkt- Rolle
- 9 halber Looping
- 10 quadratische liegende Acht
- 11 2 Umdrehungen Rückentrudeln
- 12 doppelter Immelmann mit ganzen Rollen
- 13 Hut mit Viertelrollen
- 14 negative Lawine
- 15 halber Quadratlooping mit ganzer Rolle aufwärts
- 16 Humpty-Bump von oben mit halber und Vierachtel-Rolle
- 17 halber Quadratlooping mit Zweiviertel- Rolle abwärts
- 18 M- Figur mit Dreiviertel- Rollen
- 19 Turn mit ganzer Rolle aufwärts
- 20 Zwei Zweipunkt- Rollen
- 21 Immelmann
- 22 drei Umdrehungen Trudeln
- 23 Landung

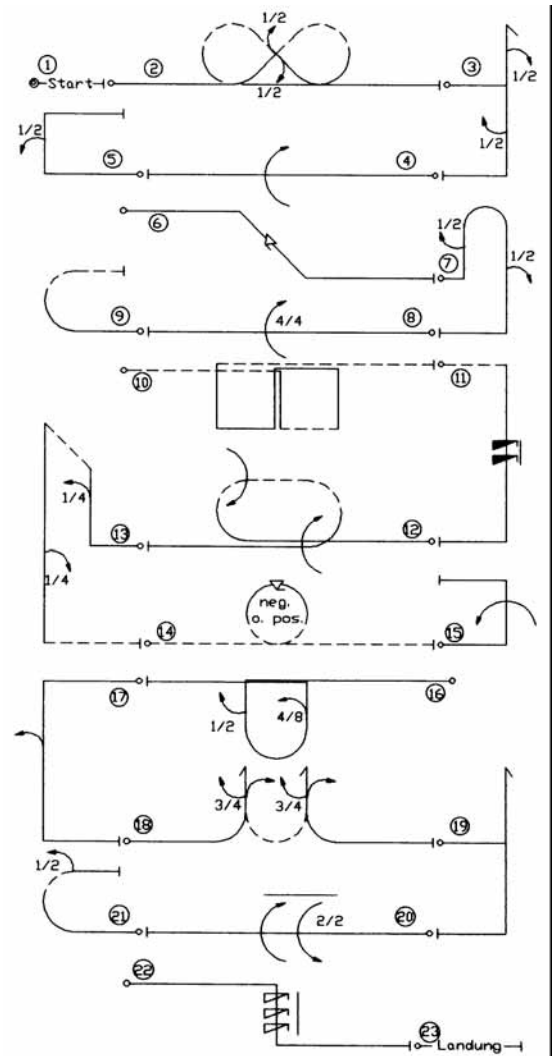


Bild 1: Das offizielle F3A- Programm für die Jahre 1992 und 93, dargestellt mit Aresti-Symbolen

Betrachtet man jedoch die Entwicklung der F3A- Modelle in den letzten Jahren, so fällt auf, daß sich hier ein Trend vom einst reinen Zweckmodell mit Speedmodellcharakter zu größeren Modellen mit vorbildähnlicherem Aussehen und Flugbild vollzogen hat.

Darüber hinaus gibt es außerdem noch eine Elektrokunstflugklasse. Diese Sparte ist allerdings noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und es gibt hier auch noch kein einheitliches Wettbewerbsreglement. Nach der rasanten Entwicklung des Elektrofluges in den letzten Jahren zu urteilen wird auf diesem Gebiet wohl in nächster Zeit der größte Entwicklungsschub zu erwarten sein.

2.2. Spezielle Anforderungen an Wettbewerbs- Kunstflugmodelle

Da Kunstflugmodelle vom Piloten gesteuert werden, der selbst am Boden steht und von hier sein Modell beobachtet, gelten einige besondere Anforderungen für Kunstflugmodelle:

- **Klare Linienführung**, um die Fluglage des Modells eindeutig erkennen zu können

Anders als der Pilot eines bemannten Flugzeuges verfügt der Modellflugpilot über keinerlei Instrumente, an denen er die Fluglage des Modells erkennen kann. So muß er auch geringste Schräglagen des Modells aus einer ungünstigen Perspektive vom Boden aus rechtzeitig erkennen können, um notwendige Korrekturen anbringen zu können.

- **Vollständige Entkopplung aller drei Achsen**

Da die Steuerung der Ruder über elektrische Rudermaschinen erfolgt und anders als beim Großflugzeug keine Rückkopplung der Ruderkraft auf den Steuerknüppel des Piloten erfolgt, ist die präzise Steuerung von Kunstflugfiguren nur möglich, wenn ein einzelnes Ruder (bzw. das Querruderpaar) auch nur eine Veränderung der Fluglage um eine Achse bewirkt.

Diese sind im einzelnen:

- Das Querruder sollte nur ein Rollmoment bewirken.
- Das Höhenruder sollte nur ein Nickmoment bewirken.
- Das Seitenruder sollte nur ein Giermoment bewirken.

Anders als beim Großflugzeug soll das Schieberollmoment also verschwinden. Das bedeutet aber auch, daß beim Ausfall der Querruder das Modell nicht mehr steuerbar ist.

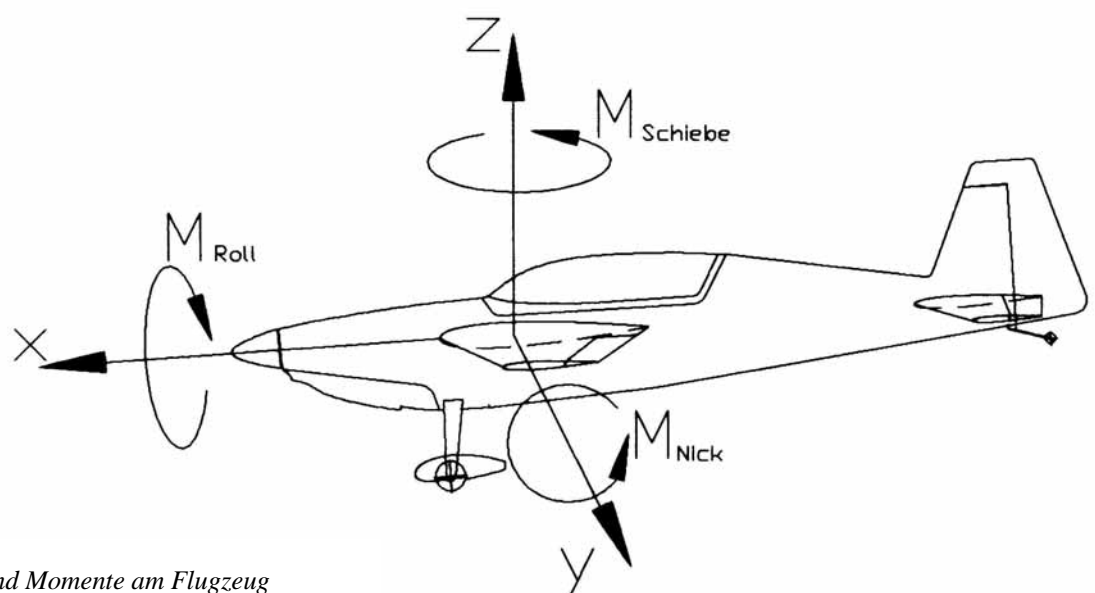


Bild 2: Achsen und Momente am Flugzeug

- Geringes Leistungsgewicht

Eine der wesentlichsten Forderungen an ein Kunstflugmodell ist, daß bei möglichst starker Motorisierung ein geringes Gewicht angestrebt werden sollte. Die Kunstflugprogramme müssen in einem begrenzten Luftraum geflogen werden und es sind lange, kraftraubende Steigflüge zu absolvieren, ohne daß dabei viel kinetische Energie ausgenutzt werden kann.

Daher ist ein geringes Leistungsgewicht bei gutem Antriebswirkungsgrad besonders im Steigflug anzustreben.

- Geringe Geräusentwicklung

Da Lärm eine große Belastung der Umwelt darstellt, unterliegt auch der Motormodellflug bestimmten Lärmbeschränkungen. Seitdem vor einigen Jahren bei Motorkunstflugwettbewerben eine Lärmbewertung eingeführt wurde (d.h.: leise Modelle bekommen Bonuspunkte, laute Modelle bekommen Punktabzüge), gilt der Motorkunstflug als richtungsweisend für die Lärmdämpfung im gesamten Motormodellbereich.

Wettbewerbskunstflugmodelle zählen inzwischen zu den leisesten Modellen, obwohl sie gleichzeitig die am stärksten motorisierten Modelle sind. Gut abgestimmte F3A- Modelle sind inzwischen kaum lauter als Elektroflugmodelle.

- Einfache Transportierbarkeit

Um ein Modell ohne größeren Aufwand in einem Pkw transportieren zu können, muß das Modell zerlegbar sein. In der Regel sind die Tragflächen zweiteilig abnehmbar. Je nach Größe des Modells und des Transportfahrzeuges sind aber auch manchmal die Leitwerke und das Fahrwerk abnehmbar.

2.3. Entwicklungsgeschichte von F3A- Modellen

Betrachtet man die Entwicklung der F3A- Modelle in den letzten 15 Jahren, so fallen sofort zwei Dinge auf:

- die Modelle sind größer und dennoch leichter geworden
- die Modelle sind leistungsstärker und dennoch leiser geworden

Wichtige Voraussetzung für diese Entwicklung war der technische Fortschritt speziell bei den Fernsteuerungskomponenten und der Motorentechnik. Eine weitere Voraussetzung war aber auch eine Reglementsänderung zu Beginn der achtziger Jahre:

Ehemals wurden im Modellkunstflug, damals noch als RC-1 Klasse bezeichnet, nur Einzelfiguren geflogen und bewertet. Das führte dazu, daß die nicht bewerteten Flugphasen zwischen den einzelnen Figuren sehr weiträumig geflogen wurden, damit das Modell für die Figur viel kinetische Energie aufnehmen konnte.

Die Modelle waren dementsprechend mit Spannweiten um 1,60 m klein und hatten eine aerodynamische schlanke Rumpfform, waren aber mit ca. 4 kg Abfluggewicht relativ schwer. Um diesem Trend zur Speedfliegerei entgegenzuwirken, wurde 1984 das erste Wendefigurenprogramm eingeführt.

Wendefigurenprogramme müssen in einem begrenzten Luftraum, dem sogenannten 120°-Fenster geflogen werden. Die Figuren werden dabei nahtlos aneinandergereiht, an den Ausflug aus jeder Figur schließt sich der Einflug in die nächste Figur an. Mit diesem neuen Reglement war die Grundlage dafür gegeben, neue Modelle zu entwickeln, die bei niedrigerer Grundgeschwindigkeit immer noch über ausreichend Steigleistung verfügen und wesentlich wendiger sind.

Das Modell Challenge von Tobias Schulz war das erste Modell dieser Kategorie und inspirierte zu zahlreichen Weiterentwicklungen mit weiter ansteigenden Spannweiten und dem Trend zu immer vorbildähnlicheren Kunstflugmodellen. Der momentane Standard ist ein Modell mit einer Spannweite um 1,90 m und einem Abfluggewicht von 3,5 bis 3,9 kg, das von einem 10 ccm Zweitakt-Langhubermotor angetrieben wird.

Da beim Kunstflug das Leistungsgewicht eine entscheidende Rolle spielt, liegt bei einem 10 ccm-Zweitaktantrieb das Maximalgewicht praktisch bei 4 kg, obwohl laut Reglement 5 kg erlaubt wären. Mit weiter vergrößerten Modellen das 5 kg-Limit voll auszuschöpfen ist also nur bei Erhöhung der Antriebsleistung möglich.

So entwickelte die Modellbauindustrie spezielle Viertaktantriebe für den Einsatz in F3A-Modellen. Leistungsspezifisch dem Zweitakter zwar klar unterlegen, hat der Viertakter dadurch Vorteile, daß bei Verwendung von Viertaktmotoren laut Reglement der doppelte Hubraum, also 20 ccm, zugelassen ist. Die Verwendung dieser Viertaktmotoren brachte aber in den derzeit üblichen F3A-Modellen bislang eher Nachteile als Vorteile. Denn diese Modelle sind praktisch für 10 ccm-Zweitaktmotoren maßgeschneidert und das höhere Eigengewicht, die relativ raue Laufkultur des Einzylinder-Viertakters sowie seine voluminösere Bauweise zehren dort die Leistungsvorteile dieser Motoren wieder auf.

Auch die Bemühungen einiger Hersteller von F3A-Modellen, Zweitakt-Modelle in leicht geänderter Ausführung als Viertaktversion anzubieten, stellte sich eher als der schlechtere Kompromiss heraus. Der Grund hierfür liegt in der anderen Leistungscharakteristik sowie im allgemein deutlich rauheren Laufverhalten des Viertakters gegenüber dem Zweitaktmotor.

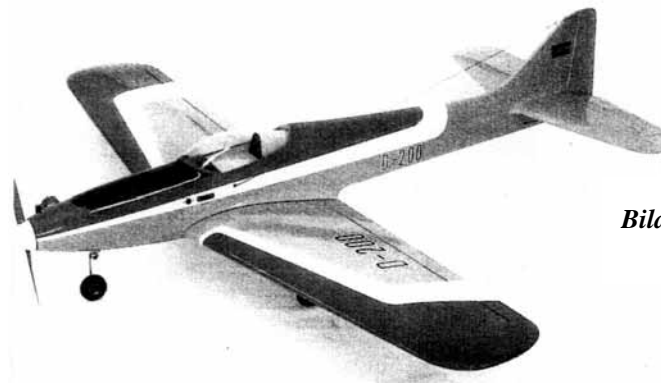


Bild 3: Der "Sultan 5" ist ein typisches RC-1 Modell /15/

Bild 4: Die "Challenge" von Tobias Schulz war eines der ersten F3A-Modelle der neuen Generation /9/

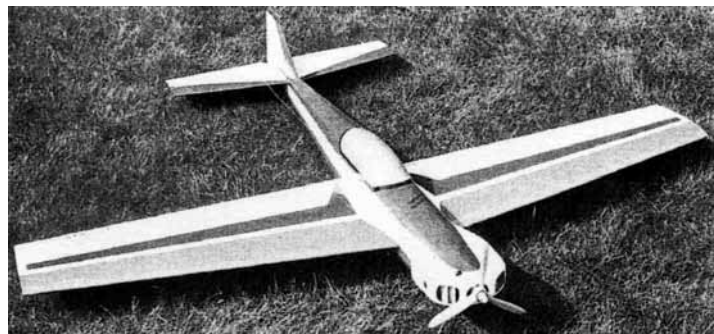


Bild 6: Die "Super Nova" ist ein modernes F3A- Modell /13/



Bild 5: F3A-X- Modelle sind deutlich größer und im Gegensatz zu den F3A- Modellen maßstäbliche Nachbauten von manntragenden Flugzeugen

3. Zielsetzung

3.1. Auswahl des Modelltyps

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell ist ein Semi-Scale Nachbau der EA 300 im Maßstab 1:3,8. Das Originalflugzeug wird von Fachleuten als das zur Zeit beste Kunstflugzeug der Welt bezeichnet und ist eine Weiterentwicklung der EA 230 und der EA 260. Im Vergleich zu den beiden Vorgängermaschinen weist die EA 300 eine höhere Streckung sowie günstigere Hebelarmverhältnisse auf, wodurch sie sich besonders zum Modellnachbau eignet.

Mit der Entscheidung, den Nachbau eines Originalflugzeuges als F3A- Modell zu konzipieren, sollte dem eingangs erwähnten Trend zu immer vorbildgetreueren F3A- Modellen weiterer Vorschub geleistet werden. Desweiteren bietet diese Auswahl aber auch ganz spezielle Vorteile:

Die EA 300 hat einen besonders voluminösen Rumpf. Die Rumpfoberfläche beträgt bei dem gewählten Modellmaßstab ungefähr das 3-fache üblicher F3A- Modelle. Eine Sandwichbauweise drängt sich dadurch geradezu auf. Der voluminösere Rumpf bietet weiter die Möglichkeit, die schwereren und baugrößeren 20 ccm- Viertaktantriebe fast vollständig zu integrieren, wobei die Krafteinleitung wesentlich günstiger gestaltet werden kann und in Verbindung mit der Wabensandwichbauweise eine sehr hohe Dämpfung auch bei rauh laufenden Triebwerken erreicht wird.

Als Vorlage für die maßstäbliche Konstruktion diente die Scale-Dokumentation, die in der FMT 3/91 abgedruckt war. Da die Konstruktionsaufgabe jedoch darin bestand, ein möglichst optimiertes Kunstflugmodell zu konzipieren, diente die Scale-Dokumentation nur als Anhaltspunkt für die äußeren Abmessungen des Modells. So wurden bei der maßstäblichen Verkleinerung Maße im Rahmen des F3A-X- Reglements verändert, um dadurch die Flugeigenschaften des Modells weiter zu verbessern. Aus dem gleichen Grunde wurde auf die Wiedergabe von Details (Nieten, Beplankungsstöße) bewußt verzichtet.

Die maßstäblichen Veränderungen bestehen im wesentlichen in der Vergrößerung der Rumpf- und Flügelstreckung sowie in einer Modifizierung der Hebelarmverhältnisse. Der Maßstab wurde so gewählt, dass das Modell mit einer Spannweite über 2 m zur Kategorie der Großmodelle zählt und damit auch in der F3A-X- Klasse starten darf.

Andererseits sollte das Modell bei entsprechender Leichtbauweise mit einem Abfluggewicht unter 5 kg fertig zu stellen sein, damit es dem Reglement der F3A- Wettbewerbsklasse genügt.

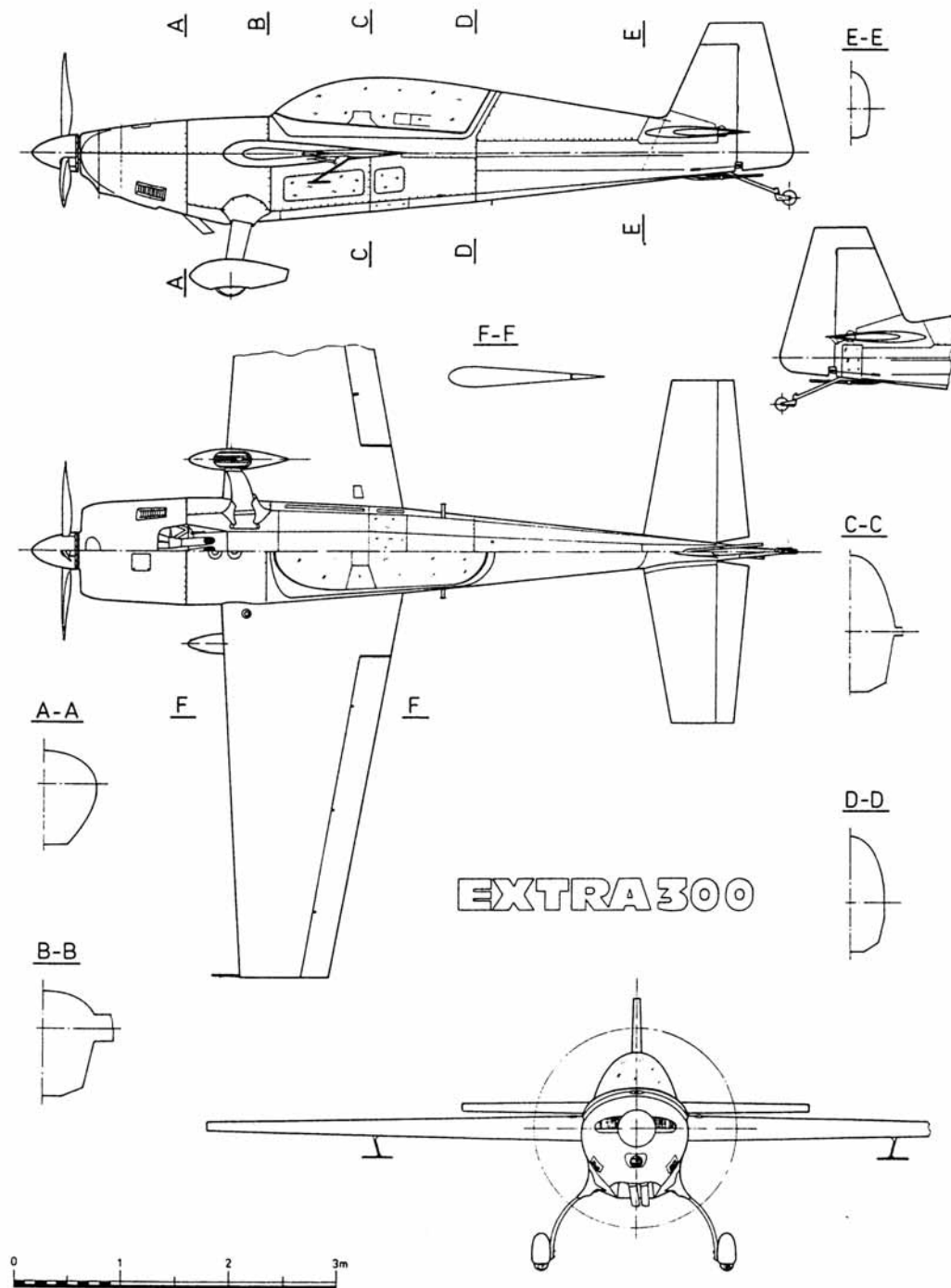


Bild 7: Als Vorlage für den Modellnachbau diente die Scale-Dokumentation aus der FMT 3/91

3.2. Besonderheiten dieser speziellen Konzeption

Die Besonderheit dieser speziellen Konzeption lag darin, daß das Modell das Reglement für die zwei Wettbewerbsklassen F3A und F3A-X erfüllen sollte, ohne daß hieraus Nachteile für den Einsatz in einer der beiden Klassen entstehen. Dadurch ergeben sich für den Wettbewerbspiloten folgende Vorteile:

- Der Wettbewerbspilot hat mit solch einem Modell die Möglichkeit an beiden Wettbewerbsklassen teilzunehmen, ohne dabei den hohen Aufwand für ein zweites Modell der anderen Klasse treiben zu müssen und ohne sich zwischendurch auf ein anderes Modell umstellen zu müssen. Dadurch kann der Pilot in kürzerer Zeit deutlich mehr Wettbewerbserfahrung sammeln. Dieses ist insbesondere dadurch von großer Bedeutung, da die Anzahl der ausgerichteten Wettbewerbe pro Klasse und Jahr sehr gering ist (2-3 F3A- Wettbewerbe, 4 F3A-X-Wettbewerbe p.a.).
- Da viele Modellflugplätze eine Aufstiegserlaubnis lediglich für Modelle bis 5 kg Abfluggewicht besitzen, ist mit der Entwicklung eines F3A-X- Modells unterhalb dieser Gewichtsgrenze für viele Piloten erstmals die Möglichkeit gegeben, überhaupt ein X- Modell zu fliegen, was außerdem auch den Einsatzbereich von F3A-X- Modellen erheblich erweitert.
- Aufgrund der äußerst geringen Flächenbelastung, die aus dem geringen Abfluggewicht resultiert, ist das Modell äußerst wendig und hat sehr gutmütige Langsamflugeigenschaften. Dadurch ist es möglich, ein Kunstflugprogramm mit einer deutlich geringeren Grundgeschwindigkeit zu absolvieren, ohne dabei Einbußen in der Steigleistung hinnehmen zu müssen. Das mit geringerer Grundgeschwindigkeit geflogene Programm wirkt dabei wesentlich ästhetischer und naturgetreuer und gibt dem Piloten mehr Zeit zum Aussteuern der einzelnen Manöver und kleinerer Korrekturen.

Die besondere Konzeption stellte aber auch hohe Anforderungen an den Leichtbau:

Gegenüber üblichen F3A-X- Modellen mussten ca. 2 kg Gewicht eingespart werden. Ca. 1 kg waren dabei bei der Struktur einzusparen. Ein weiteres kg konnte durch eine strenge Diät bei allen Einbauten sowie dem kleineren und leichteren Triebwerk eingespart werden (bei F3A-X-Modellen kommen zumeist großvolumige Benzinmotoren zum Einsatz, die alle relativ schwer sind).

Gegenüber herkömmlichen F3A- Modellen durfte das Modell allerdings ca. 1 kg schwerer werden, wenn man das 5 kg-Limit voll ausschöpfen wollte. Ca. 500 g entfallen dabei allein auf den Antrieb, da der 20 ccm Viertakter deutlich schwerer ist als der 10 ccm Zweitakter. Da das Modell erheblich größer ist als übliche F3A- Modelle, sind 500 g Mehrgewicht für die Zelle und alle weiteren Einbauten sehr wenig. Man bedenke allein die 3-fache Rumpfoberfläche gegenüber herkömmlichen F3A- Modellen.

3.3. Rahmendaten

Die Rahmendaten ergeben sich aus den Wettbewerbsreglements der Klassen F3A und F3A-X.

Die Anforderungen des F3A- Reglements sind:

- Abfluggewicht maximal 5 kg
- Hubraumbegrenzung des Antriebes auf 10 ccm bei Zweitaktern und 20 ccm bei Viertaktern, keine Begrenzung bei Elektroantrieben
- Gesamtflächeninhalt unter 150 dm²
- Auslegung des Modells als Flächenmodell, d.h.: kein Hubschrauber

Die Anforderungen des F3A-X- Reglements sind:

- Mindestspannweite 2 m bei Eindeckern, 1,8 m bei Doppeldeckern
- erkennbarer Nachbau eines mantragenden Kunstflugzeuges
- Abweichung der Hauptabmessungen, die sich bei der maßstäblichen Verkleinerung ergeben, von nicht mehr als 10%. Dabei wird der Maßstab zu Grunde gelegt, der sich aus dem Spannweitenverhältnis ergibt.
- Abfluggewicht maximal 10 kg

Für beide Klassen gilt weiterhin aufgrund der hierzulande geltenden gesetzlichen Bestimmungen für Flugmodelle, daß die maximale Lärmentwicklung in 7 m Entfernung gemessen nicht größer als 83 dBA sein darf.

Da in beiden Klassen eine subjektive Lärmbewertung durchgeführt wird und deshalb insbesondere F3A- Modelle zu den leisesten Motorflugmodellen überhaupt zählen galt es hier, diese maximalen Lärmgrenzen möglichst weit zu unterbieten.

3.4. Anforderungsliste

Die verschiedenen Anforderungen sind je nach Dringlichkeit in 3 Kategorien unterteilt:

- "Muß-"Anforderungen müssen auf jeden Fall erfüllt werden. Lösungsansätze, die diese Anforderungen nicht erfüllen, scheiden von vornherein aus.
- Bei den" Soll-" Anforderungen ist davon auszugehen, daß auch diese zu erfüllen sind. Wenn aber dadurch andere Anforderungen erheblich beeinträchtigt werden oder andere gravierende Nachteile damit verbunden sind, muß sorgfältig abgewogen werden, ob eine solche Anforderung fallen gelassen werden kann.
- "Kann-" Anforderungen sind in der Regel von untergeordneter Bedeutung. Ihre Erfüllung ist wünschenswert, wenn sie ohne größeren Aufwand und ohne Beeinträchtigung übergeordneter Anforderungen geschehen kann.

Anforderungen	Muß	Soll	Kann
Konzeption			
Abfluggewicht < 5000 g	X		
Hubraumlimit 20 ccm Viertakt, 10 ccm Zweitakt	X		
Gesamtflächeninhalt maximal 150 dm ²	X		
erkennbarer Nachbau gemäß F3A-X-Reglement	X		
Spannweite > 2m	X		
Lärmgrenze 83 dBA	X		
Lärmgrenze 80 dBA		X	
Leistungsgewicht unter 3 kg/kW	X		
klare Linienführung		X	
indifferentes Flugverhalten	X		
gute Aerodynamik		X	
einfache Transportierbarkeit		X	
Technische Ausführung			
Tragflächen geteilt abnehmbar	X		
Leitwerk abnehmbar		X	
Fahrwerk abnehmbar			X
vollintegrierte Triebwerks- und Schalldämpferanlage		X	
elastische Motoraufhängung	X		
Motorluftansaugung aus dem Rumpf			X
gute Zugänglichkeit aller Einbauten		X	
verdeckte bzw. verkleidete Ruderanlenkungen		X	
Fertigung			
Fertigung ohne hohen Investitionsbedarf	X		
wesentliche Strukturbauteile in Wabensandwichbauweise	X		
gute Reproduzierbarkeit	X		
kostengünstige Herstellung im Kleinserienverfahren		X	
Mehrfarblackierung der GfK- Bauteile in der Form			X

Bild 8: Anforderungsliste

4. Aufbau des Modells

4.1. Technische Daten

Kategorie:	F3A-, F3A-X- Kunstflugmodell vom Typ EA 300	
Nachbaumaßstab:	1:3,8 (bezogen auf das Spannweitenverhältnis)	
Spannweite:	2100 mm	
Länge über Alles:	1810 mm	
Tragflächeninhalt:	71,0 dm ²	
Höhenleitwerksinhalt:	14,7 dm ²	
Gesamtflächeninhalt:	85,7 dm ²	
Abfluggewicht:	4900 g	
Gesamtflächenbelastung:	57,2 g/dm ²	
Leistungsgewicht:	2,8 kg/kW	
Antrieb:		
Methanol- Verbrennungsmotor	Yamada 120 SF, 20 ccm Viertakt	
Leistung:	1,8 kW	
Luftschraube:	15 x 11 APC	
Standdrehzahl:	8500 U/min	
Motoraufhängung:	elastische Vierpunktaufhängung System Altenkirch/Russow	
aerodynamische Kennwerte:		
Streckung:	6,3	
Tragflächenprofil:	<i>Tragflächenwurzel:</i>	NACA 0012
	<i>Randbogen:</i>	NACA 0009
Höhenleitwerksprofil:	NACA 0009	
Einstellwinkeldifferenz:	0,45°	
aerodynamisch wirksame Profiltiefe:	357,6 mm	
aerodynamisch wirksamer Hlw- Hebelarm:	967 mm	
Stabilitätsfaktor um die Querachse:	0,62	
errechnete Abrißgeschwindigkeit:	v _{min} = 11,7m/s = 42,1 km/h (c _a = 0,82 bei Re = 220.000)	
Minimale Aufsetzgeschwindigkeit: (bei Bodeneffekt)	v _{lande} = 10,6 m/s = 38,2 km/h (c _{a,max} = 1,0)	

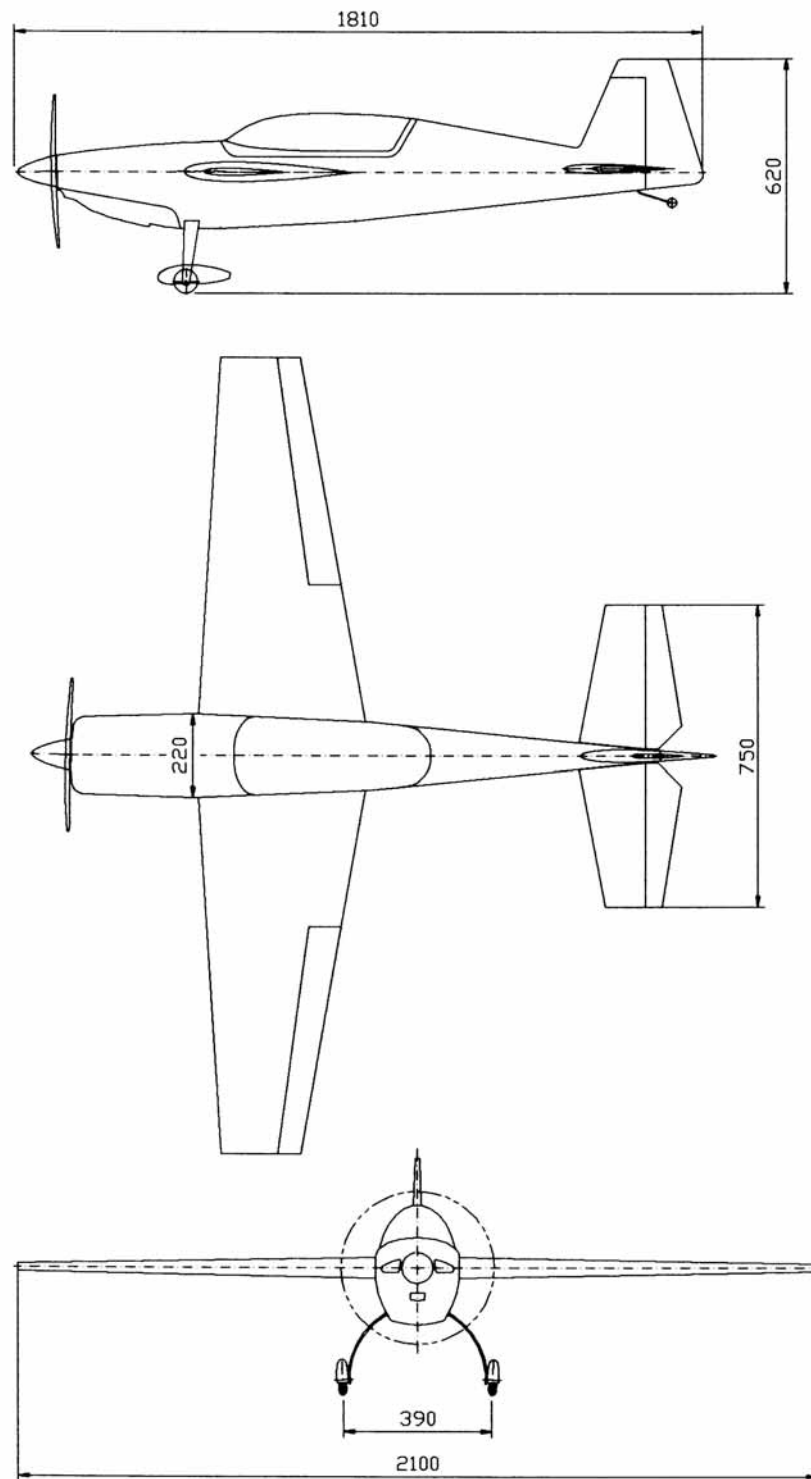


Bild 9: 3- Seitenansicht des Modells mit den Hauptabmessungen

4.2. Konstruktive Maßnahmen

Um die Anforderungen an das geringe Gewicht, eine optimale Lärmdämpfung sowie die Herstellbarkeit in Wabensandwichbauweise erfüllen zu können, waren einige konstruktive Maßnahmen erforderlich, die von den üblichen Bauweisen insbesondere der F3A-X-Modelle abweichen.

Diese seien hier besonders erläutert:

- Der Rumpf besitzt eine durchgehende Bauweise bis zum Spinneransatz. Eine relativ kleine Motorhaube gewährleistet den guten Zugang zum Motorraum von der Unterseite her.
- Diese Bauweise hat sich bei F3A- Modellen bewährt, ist aber bei F3A-X- Modellen bislang noch nicht angewendet worden.

Sie bietet folgende Vorteile:

- Der Rumpf bildet bis zum Spinneransatz einen halb geschlossenen, verwindungssteifen Kasten. Dadurch wird die Verwendung der elastischen Motoraufhängung nach dem System Altenkirch/Russow ermöglicht.
- Diese gewährleistet eine optimale Einleitung der Triebwerkskräfte in den Rumpf bei guter Dämpfung durch Gummi- Schwingelemente.
- Da die Vierpunktaufhängung wesentlich einfacher ist als andere elastische Motoraufhängungen, ist sie auch wesentlich leichter. Die Gewichtseinsparung hierbei beträgt ca. 150 g.
- Außerdem ermöglicht sie auf einfache Weise die nachträgliche Veränderung von Motorseitenzug und -sturz, ohne dass der Spinner dabei aus der Rumpfmittle wandert. Dieses ist sehr hilfreich beim Einfliegen und bei der Feinabstimmung des Modells.
- Wegen der besseren Krafteinleitung kann weiterhin der Motorspann deutlich schwächer dimensioniert werden. Die Gewichtseinsparung hierdurch beträgt ca. 50 g.
- Auch entfällt bei dieser Bauweise die Doppelwandigkeit von Rumpf und Motorhaube, wie sie bei den allgemein üblichen übergestülpten Motorhauben vorkommt. Die Gewichtseinsparung dadurch beträgt noch einmal ca. 50 g.

Es sei aber hierbei erwähnt, dass diese Vorteile im wesentlichen nur bei Verwendung der Vierpunktaufhängung ausgenutzt werden können. Diese ist aber nur bei Flanschmotoren realisierbar. Bei einer Rückwandbefestigung, wie sie bei großvolumigen Benzinmotoren üblich ist, bedingt die geschlossene Bauweise eine schlechtere Zugänglichkeit zum Triebwerk.

Weiterhin besitzt der Rumpf keine Tragflächen- und Höhenleitwerksanforderungen und auch keine Sicken für den Fahrwerkseinbau. Dadurch werden Kanten vermieden, die aufgefüllt werden müssten und dadurch zu Mehrgewicht führen und außerdem den Laminiervorgang und insbesondere das Einlegen des Sandwiches unnötig verkomplizieren.

Das Hauptfahrwerk ist zweigeteilt, wobei die einzelnen Fahrwerksbeine seitlich in den Rumpf gesteckt und mit der Rumpfsseitenwand verschraubt werden. Durch die besondere Formgebung der Fahrwerksbeine und die elastische Aufnahme im Rumpfeintrittsbereich ist die Energieaufnahme des Hauptfahrwerkes sehr hoch, ohne daß größere Verstärkungselemente notwendig sind.

Dieses bedeutet nochmals eine deutliche Gewichtseinsparung gegenüber anderen Lösungen.

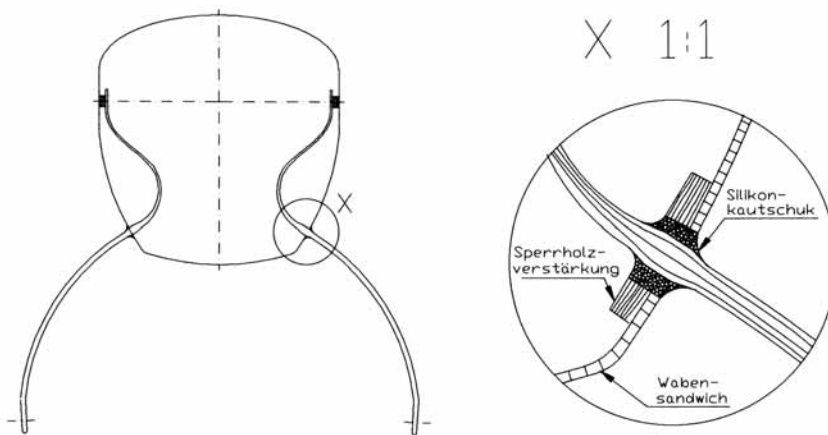


Bild 10: Durch die besondere Formgebung besitzt das Fahrwerk eine hohe Verformbarkeit und eine hohe Energieaufnahmefähigkeit.

Bild 11: Aufgrund der durchgehenden Rumpfbauweise erhält man weit vorne liegende Befestigungspunkte zur Aufnahme der Vierpunktaufhängung

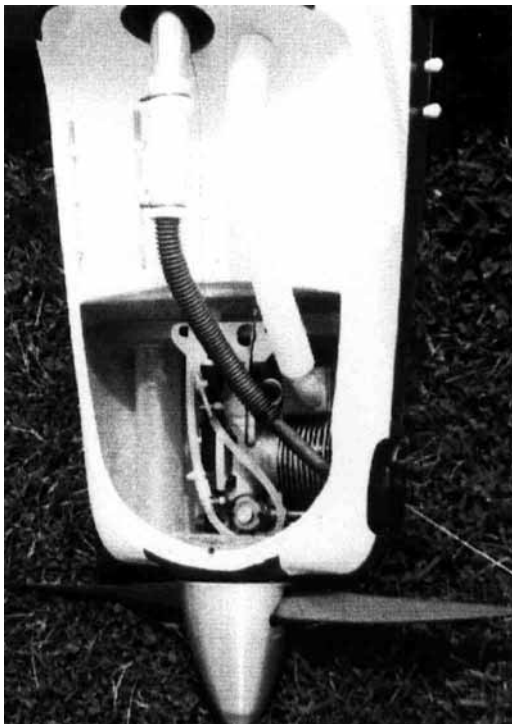
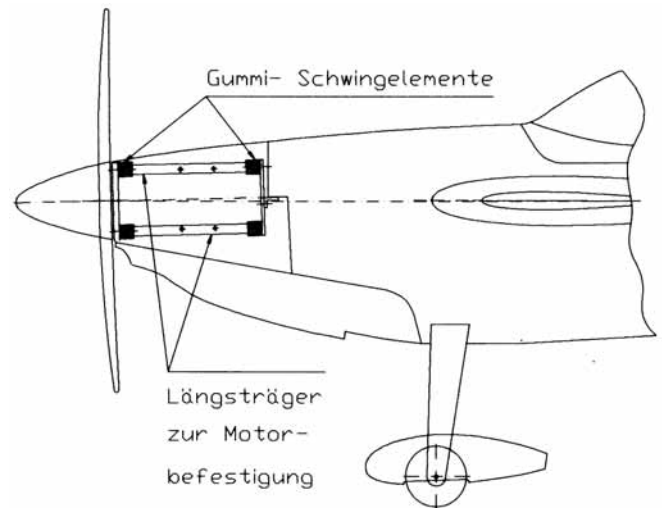


Bild 12: Der Einbau des Einzylinder-Viertaktmotors ist unter Verwendung der Vierpunktaufhängung relativ einfach. Die Vibrationen des Motors werden durch die Gummischwingelemente optimal gedämpft.



Bild 13: Im Vergleich dazu ist eine elastische Motoraufhängung bei einer konventionellen Rumpfbauweise nur sehr aufwendig zu realisieren.

4.3. Modellaufbau

Bild 14 und die folgenden Tabellen geben Bauausführung und Bauweise der wesentlichen Bauteile an, die im Rahmen dieser Arbeit konstruiert und gefertigt wurden.

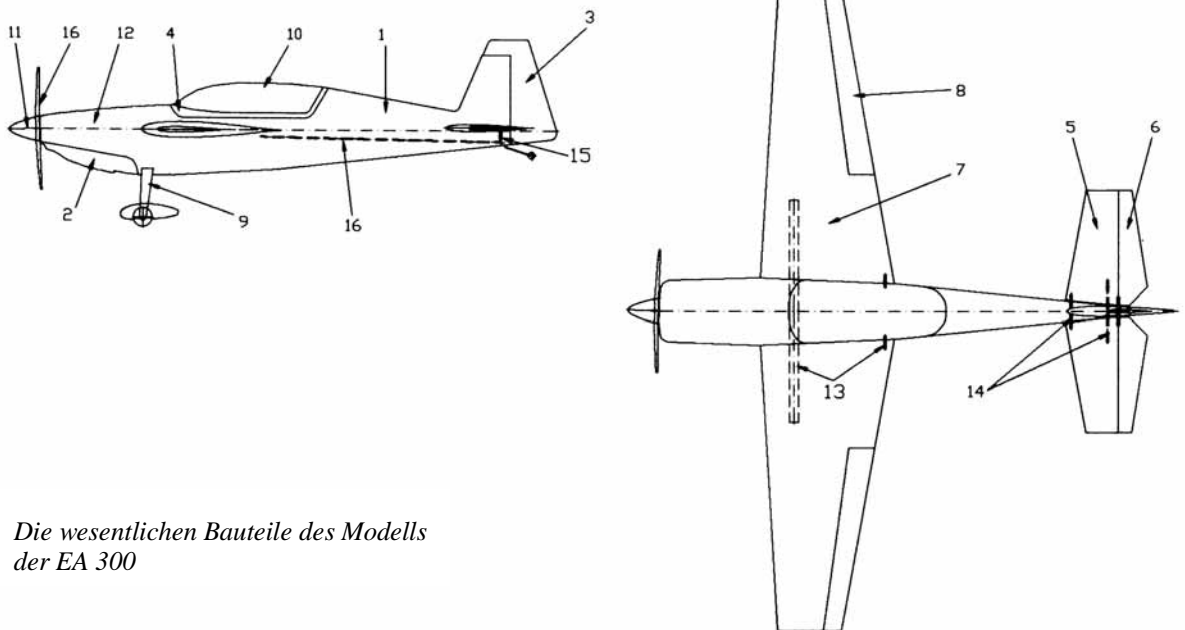


Bild 14: Die wesentlichen Bauteile des Modells der EA 300

Pos.-Nr.	Bauteil	Ausführung	Bauweise
1	Rumpf	einteilig mit Naht	Wabensandwich
2	Motorhaube	einteilig mit Naht	GfK
3	Seitenruder	einteilig mit Naht	Wabensandwich
4	Kabinenhaubenrahmen	einteilig	Wabensandwich
5	Höhenleitwerk	geteilt, gesteckt	Wabensandwich
6	Höhenruder	Hohlkehle	Wabensandwich
7	Tragfläche	geteilt, gesteckt	Wabensandwich
8	Querruder	Hohlkehle	Wabensandwich
9	Hauptfahrwerk	zweiteilig	CfK/AfK

Alle großflächigen Bauteile sind in Wabensandwichbauweise gefertigt. Eine Ausnahme bildet hier lediglich die Motorhaube. Da bei der hier angewendeten Wabensandwichbauweise das innere Decklaminat sehr dünn und auch nicht flüssigkeitsdicht ist, würden bei Verwendung eines Verbrennungsmotors Öl und Schmutz in die Wabenhohlräume eindringen können, was dann zu erheblicher Gewichtszunahme führt. Praktische Versuche haben gezeigt, daß es insgesamt günstiger ist, im Motorbereich ein Vollaminat zu verwenden, als das innere Decklaminat zu verstärken.

Zur Fertigstellung des Modells waren neben den eingangs aufgeführten Bauteilen weiterhin noch folgende Bauteile und Baugruppen notwendig, die als Fertigungskomponenten zu beschaffen waren:

<i>Pos.- Nr.</i>	<i>Bauteil/Baugruppe</i>	<i>Material</i>	<i>Bezugsquelle</i>
10	Kabinenhaube	Kunststoff- Tiefziehteil	Firma Lagemann
11	Spinner	Aluminium	Firma Topp
12	Vierpunktaufhängung	CfK	K. Pohlmann
13	Tragflächensteckung	Alurohr/GfK- Hülse	Firma GM- Modelltechnik
14	Höhenleitwerkssteckung	CfK- Stab	R&G- Flüssigkunststoffe
15	Höhenruderanschluß	Alu/Kunststoff	Firma Giezendanner
16	Höhenruder- Schubstange	CfK- Rohr	R&G Flüssigkunststoffe
	Motor		Fachhandel
	Fernsteuerung und Zubehör		Firma Graupner/ Fachhandel
	diverses Kleinmaterial		Fachhandel

Erläuterungen des Aufbaus:

Die zweigeteilte Tragfläche wird seitlich mit einem 30 x 1 Aluminiumrohr an den Rumpf gesteckt. Ein 6 mm CfK- Dübel sichert die Hälften gegen Verdrehen. Gegen axiale Verschiebung sind beide Tragflächenhälften mit dem Alurohr verschraubt.

Die Tragfläche ist als holmlose Schale ausgelegt, die lediglich durch zwei Roofmatestege gegen übermäßige Profilverformung unter Last versteift ist. Das Aluminiumrohr nimmt damit sowohl die Biegemomente als auch die Querkräfte auf.

Von der Gestaltungsweise ist dieser Aufbau zwar festigkeitsmäßig relativ ungünstig und einem klassischen Holmaufbau weit unterlegen, bei den Festigkeitsberechnungen stellte sich allerdings heraus, daß selbst bei Minimaldimensionierung der Schale gegen örtliches Beulen die Schale alle weiteren auftretenden Lasten aufnehmen kann. Der Einsatz eines Holmverbinders würde nur mit einem erheblichen Mehraufwand zu einer deutlichen Überdimensionierung führen, ohne daß dabei weiteres Gewicht eingespart werden könnte. Deshalb wurde diese einfachere Bauweise ausgewählt.

Die Querruder sind wie alle anderen Ruder auch mittels Stiftscharnieren mit der Dämpfungsfläche verbunden. Jedes Querruder wird von einem in der Fläche eingebauten Servo direkt angesteuert.

Das zweigeteilte Höhenleitwerk enthält nur einen Roofmatesteg und ist ebenfalls seitlich an den Rumpf gesteckt. Als Biegeträger dient hier ein 6 mm CfK- Stab. Der Höhenruderanschluß erfolgt automatisch mit einem 6 mm Aluminiumvierkant (System Giezendanner). Der Winkelhebel des Höhenruderantriebes wird über eine 5 mm CfK- Schubstange vom zentral im Rumpf angeordneten Servo angesteuert.

Die Seitenruderanlenkung erfolgt beidseitig über kunststoffummantelte 0,7 mm Stahlseile vom ebenfalls zentral im Rumpf angeordneten Servo.

Um eine gute Zugänglichkeit aller Einbauten zu gewährleisten, sind die Motorhaube und die Kabinenhaube mit jeweils nur einer Schraube und zwei Sicherungsdübeln verbunden.

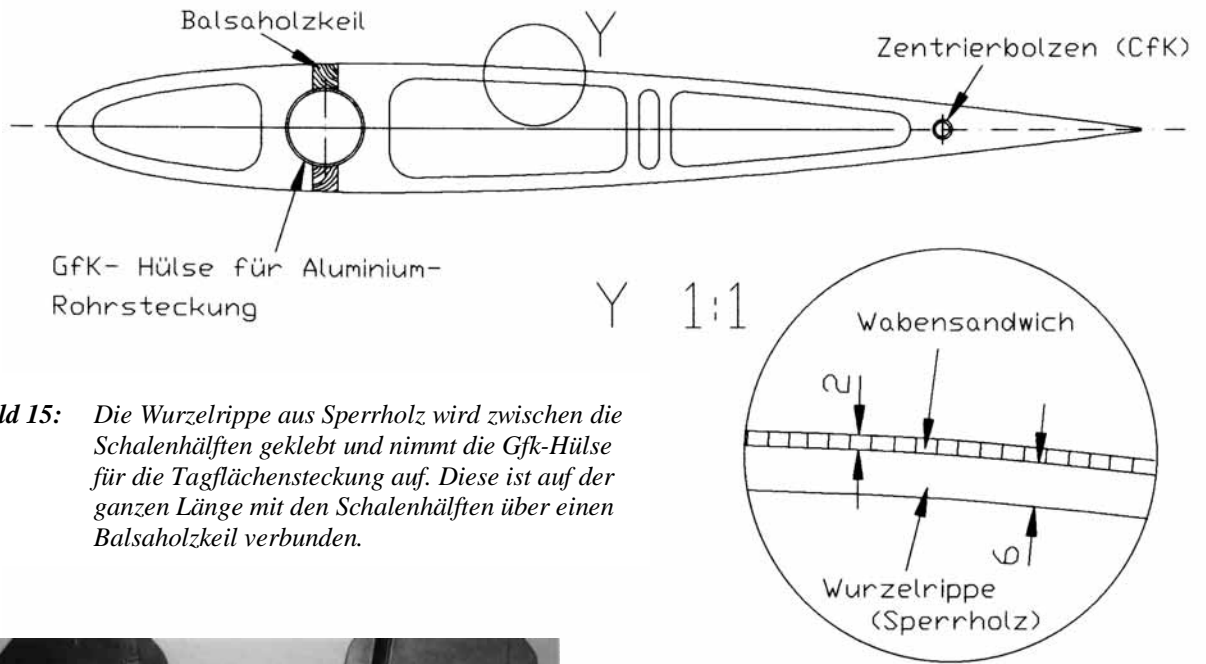


Bild 15: Die Wurzelrippe aus Sperrholz wird zwischen die Schalenhälften geklebt und nimmt die GfK-Hülse für die Tragflächensteckung auf. Diese ist auf der ganzen Länge mit den Schalenhälften über einen Balsaholzkeil verbunden.



Bild 16: Die Tragflügelschalen vor dem Zusammenkleben. Deutlich zu ist die Position der Rohrsteckung.

4.4. Flugmechanische Überlegungen

Die Auslegung der flugmechanischen Kenngrößen erfolgt bei Kunstflugmodellen zumeist empirisch. Proportionen und Profilkombinationen, die sich bewährt haben, werden schrittweise geringfügig verändert, um zu optimalen Flugeigenschaften zu gelangen.

Die Eigenschaften, die es dabei zu optimieren gilt, sind die folgenden:

- **Achsneutralität**
- **Flugstabilität**
- **Abrißverhalten**
- **Langsamflugeigenschaften**
- **Rolleigenschaften**

Diese Eigenschaften werden im Wesentlichen beeinflusst durch:

- **Festlegung der Gesamtproportionen**
- **Achsabstände**
- **Hebelarmverhältnisse**
- **Profilauswahl**
- **V-Form**
- **Schwerpunktlage**
- **Einstellwinkeldifferenz (EWD)**
- **Motorseitenzug und -sturz**

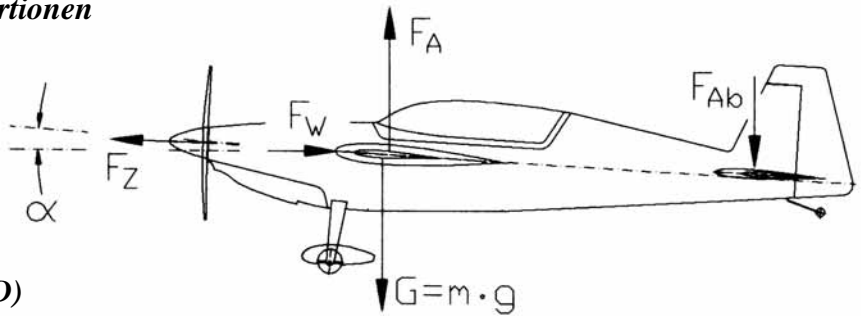


Bild 17: Kräfte am Modell im stationären Horizontalflug. Durch Festlegung der Achsabstände und der Hebelarmverhältnisse werden das Zusammenwirken der Kräfte und damit die Flugeigenschaften wesentlich beeinflusst

Da die exakte rechnerische Erfassung aller beeinflussenden Komponenten für unterschiedliche Fluglagen einen enormen Aufwand darstellt und für den vorliegenden Anwendungsfall gar nicht notwendig ist, werden an dieser Stelle einige qualitative Aussagen gemacht:

Achsneutralität:

Im Laufe der Zeit haben sich bestimmte Proportionen herauskristallisiert, die inzwischen bei fast allen ernstzunehmenden Wettbewerbs- Kunstflugmodellen in nur sehr geringen Band-breiten variieren und eine gute Achsneutralität gewährleisten.

So ist eindeutig, wie bei den bemannten Kunstflugzeugen auch, ein Trend zum Mitteldecker festzustellen. Der Grund hierfür ist sehr einfach: Da für die Normalfluglage und für den Rückenflug gleiche Flugeigenschaften gefordert werden, ist dieses am einfachsten durch eine symmetrische Anordnung zu realisieren.

Zwar ist ein achsneutrales Flugverhalten auch mit einem Tiefdecker oder einem Schulterdecker zu erreichen, hier ist dann aber die Abstimmung von V-Form, EWD, Schwerpunktlage und Höhenleitwerksposition wesentlich schwieriger zu optimieren.

Der symmetrischen Anordnung entsprechend hat es sich als günstig erwiesen, wenn die horizontalen Achsabstände sehr gering sind. Als reine Mitteldeckerkonfiguration gilt, wenn Propeller und Tragflügelsehne auf einer Achse in der Rumpfmittle liegen. Dieses ist beispielsweise bei dem Originalflugzeug EA 300 der Fall.

Als schmerzlich wird im Modellkunstflug die Tatsache empfunden, dass das Höhenleitwerk bei nahezu allen bemannten Kunstflugzeugen hierzu relativ hoch positioniert ist. Im bemannten Kunstflugzeugbau hat dieses zumeist konstruktionstechnische Gründe:

Das durchgehende Höhenleitwerk wird einfach auf den Gitterrohrrahmen des Rumpfes aufgesetzt. Eine derartige Positionierung hat beim Modellkunstflugzeug zur Folge, dass das Modell im Messerflug über das Höhenruder wegdriftet.

Im Grund genommen ist dies eine Folge der Servosteuerung im Modellflug. Bei direkter Ansteuerung aller Ruder im bemannten Kunstflug mit entsprechender Ruderkräftekopplung geschieht der Messerflug für das Höhenruder kraftlos, womit das Wegdriften entfällt.

Für die Konstruktion eines maßstäblichen Modellkunstflugzeuges bedeutet dies, dass die Höhenleitwerksposition erheblich verändert werden muss. Bewährt hat sich hier die Positionierung geringfügig oberhalb der Rumpfmittelachse. Da dieses bei fast allen Kunstflugzeugnachbauten geschehen muss, wird dieser maßstäbliche Fehler selbst beim strengen F3A-X- Classement in Las-Vegas nicht geahndet.

Obwohl die Parameter V-Form, Einstellwinkeldifferenz und Schwerpunkt bei jedem Modell erst beim Einfliegen exakt abgestimmt und optimiert werden, kann man gewisse Anhaltswerte angeben, die gewährleisten, dass man vom anzustrebenden Optimum nicht weit entfernt ist. Bei einer reinen Mitteldeckerkonfiguration kann im Allgemeinen die V-Form Null gesetzt werden (Profilselne gestreckt). Genau genommen ist auch hier die V-Form von der vertikalen Schwerpunktlage und den aerodynamischen Verhältnissen abhängig, bei insgesamt geringen Achsabständen und symmetrischer Anordnung der Einbauten im Rumpf ist dies aber ein sehr guter Anhaltswert.

Da die Originalmaschine der EA 300 als reiner Mitteldecker auf diese Weise ausgelegt ist, wurde diese Konfiguration auch beim Modell so beibehalten. Lediglich die Höhenleitwerksposition wurde aus den genannten Gründen geändert. Die Profilselne des Höhenleitwerks ist 10 mm über der Rumpfmittelachse positioniert. Als Einstellwinkel kommen für den Kunstflug nur kleine Winkel in Frage. Hierbei haben sich Winkel zwischen 0° und $0,5^\circ$ bei Mitteldeckern und mitteldeckerähnlichen Konfigurationen bewährt. Beim Modell der EA 300 wurde eine EWD von $0,45^\circ$ gewählt.

Flugstabilität:

Flugstabilität und Achsneutralität sind zwei Eigenschaften, die sich zumeist konträr zueinander verhalten. So erhält man bei größerer V-Form eine größere Querstabilität (Stabilität um die Längsachse). Dieses würde aber gleichzeitig zu schlechteren Messerflug- und Rolleigenschaften sowie zu instabilen Rückenflugeigenschaften führen.

Eine weitere Möglichkeit die Querstabilität zu erhöhen ist, den Tragflügel zu schränken. D.h.: Der Anstellwinkel nimmt von der Tragflügelwurzel zum Randbogen hin ab. Dies hat außerdem noch den Vorteil, dass bei richtig gewählter Schränkung der induzierte Widerstand deutlich verringert wird und zudem die Längsstabilität erhöht wird. Da jedoch bei einer Tragflügelschränkung die Vorteile des Normalfluges sich beim Rückenflug in Nachteile umkehren, kommt eine Tragflügelschränkung für den Kunstflug ebenfalls nicht in Betracht. Deshalb werden bei Kunstflugzeugen und -modellen Konfigurationen gewählt, die im Schnellflug ein indifferentes, aber somit achsneutrales Flugverhalten gewährleisten.

Um eine ausreichende Längsstabilität zu gewährleisten, müssen allerdings der Höhenleitwerkshebelarm und die Höhenleitwerksfläche ausreichend groß gewählt werden. Dieses wird in Kapitel 4.5 explizit nachgewiesen.

Abrißverhalten und Langsamflugeigenschaften:

Im Kunstflug wird folgendes Abrissverhalten gewünscht: Im Langsamflug soll ein Abriss, wenn überhaupt, möglichst langsam und weich erfolgen und nur bei stark gezogenem Höhenruder auftreten können. Bei stark gezogenem Höhenruder kombiniert mit einem starken Seitenruderausschlag ist für gerissene Figuren ein abruptes Abreißen erwünscht. Bei Rücknahme der Ruderausschläge sollte die Strömung möglichst rasch wieder anliegen, damit diese Figuren durch exaktes Einrasten möglichst präzise beendet werden können.

Diese Abrisseigenschaften werden wesentlich von der Profilauswahl sowie dem Trägheitsmoment um die Längsachse bestimmt. Wegen des Einflusses auf die Rolldämpfung spielt hierbei auch die Tragflächengeometrie eine wichtige Rolle.

Eine Verbesserung der Abrisseigenschaften und der Querstabilität für den Langsamflug kann durch eine sorgfältige Profilauswahl erfolgen: Wählt man für die Tragflügelwurzel ein Profil, bei dem der Auftriebswert c_a schon bei geringeren Anstellwinkeln als beim Randbogenprofil abfällt, so trägt dies wesentlich zur Längsstabilität bei. Dieses ist beispielsweise der Fall, wenn man ein dickeres Profil der NACA-Reihe als Wurzelprofil mit einem dünneren Profil derselben Reihe als Randbogenprofil kombiniert. Neben den flugmechanischen Vorteilen bietet diese Kombination auch noch statische Vorteile für den Tragflügel.

Bild 18 zeigt den Verlauf der Auftriebsbeiwerte der NACA-Profile unterschiedlicher Dicke über

den Anstellwinkel α . Deutlich zu erkennen ist, dass mit zunehmender Profildicke zwar der maximale Auftriebsbeiwert c_a geringfügig ansteigt, bei weiter zunehmendem Anstellwinkel aber dann wesentlich stärker wieder abfällt als bei den dünneren Profilen der gleichen Reihe.

Während für hohe Flächenbelastungen über 80 g/dm^2 eher dickere Profile mit einer maximalen Dicke von 15 % gewählt werden sollten, sind bei geringeren Flächenbelastungen unter 70 g/dm^2 die dünnen Profile mit einer maximalen Dicke bis 12 % besser geeignet. Bei Flächenbelastungen um 60 g/dm^2 hat sich dabei besonders die Kombination NACA 0012 als Wurzel- und NACA 0009 als Randbogenprofil bewährt.

Bei nur schwach oder ungepfeilter Tragflügelgeometrie (t/4-Linie gestreckt) und bei Mindestrandbogentiefen von 180 mm weist diese Profilkombination bei guten Abrisseigenschaften exzellente Langsamflugeigenschaften auf.

Hierbei geht das Modell im Langsamflug, wenn das Höhenruder vorsichtig immer weiter durchgezogen wird, bei Unterschreitung der Minimalgeschwindigkeit in einen stabilen Sackflug über (Neutralstellung der anderen Ruder vorausgesetzt). Wird das Höhenruder bis zu einem gewissen Maße

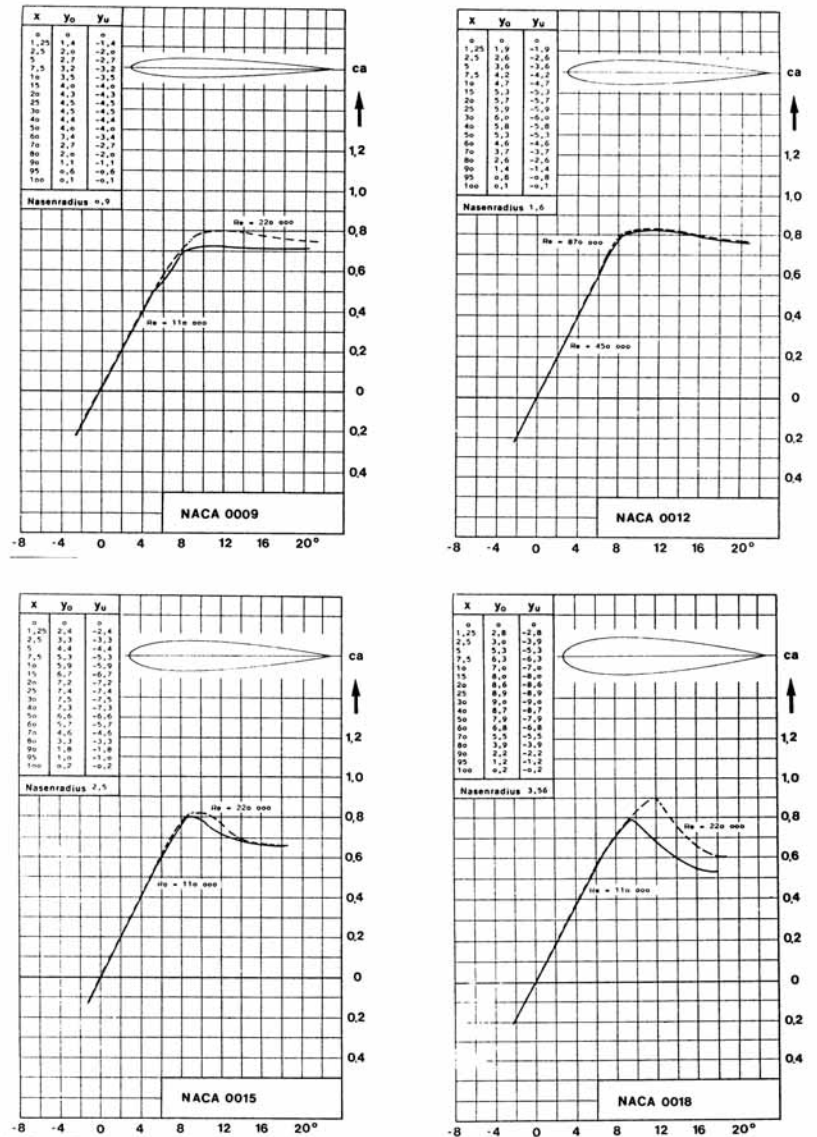


Bild 18: Auftriebsbeiwerte der NACA-Profile unterschiedlicher Dicke über den Anstellwinkel α .

weiter durchgezogen, pendelt das Modell zwischen Schräglagen von bis zu 20° zu jeder Seite hin und her, ohne letztlich zu einer Seite ganz abzukippen.

Grundvoraussetzung dafür ist allerdings, dass das Modell sehr exakt um die Längsachse ausgewogen ist. Nur geringe Lastigkeiten zu einer Seite können dazu führen, dass das Modell im Langsamflug und auch bei engen Manövern immer zu dieser Seite ausbricht.

Rolleigenschaften:

Die Rolleigenschaften von Kunstflugzeugen und -modellen werden von der Tragflügelstreckung, der V-Form, der Tragflügelgeometrie, dem Leitwerkshebelarm und einer eventuellen Differenzierung der Querruderausschläge bestimmt.

Der Mitteldecker ohne V-Form bildet hierbei die günstigste Konfiguration. Eine Querruderdifferenzierung ist hier allgemein nicht notwendig. Deutlich verbessert werden die Rolleigenschaften durch einen langen Leitwerkshebelarm. Ein Verhältnis von Spannweite zu aerodynamischem Höhenleitwerkshebelarm von 2,0 bis 2,3 bietet ideale Voraussetzungen.

Eine Tragflügelpfeilung verbessert ebenfalls die Rolleigenschaften. Da dadurch aber erhebliche Nachteile im Langsamflug und unter hohen Manöverlasten entstehen, sollte, wenn überhaupt, nur eine geringe Pfeilung gewählt werden.

4.5. Flugmechanische Berechnungen

geometrische Ausgangswerte

Tragfläche

Spannweite:	$b = 2.100 \text{ mm}$
Wurzeltiefe: (projiziert auf Rumpfmittle)	$t_w = 460 \text{ mm}$
Wurzelprofil:	NACA 0012
Randbogentiefe:	$t_r = 210 \text{ mm}$
Randbogenprofil:	NACA 0009
Pfeilung der t/4-Linie:	0°
V-Form:	0° (Sehne gestreckt)
Profilmomentenbeiwert:	$cm_0 = 0$
EWD	$\alpha = 0,45^\circ$

Die Tragflügelfläche ist:

$$F = \frac{t_w + t_r}{2} \cdot b = 70,35 \text{ dm}^2$$

Die aerodynamisch wirksame Profiltiefe des Trapezflügels ist:

$$t_{ae} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (t_w^2 + t_r^2)} = 357,6 \text{ mm}$$

Sie liegt bei ca. 41 % der Halbspannweite:

$$\frac{y_{ae}}{b/2} = \frac{t_w - t_{ae}}{t_w - t_r} = 40,98\%$$

$$\Rightarrow y_{ae} = 430,3 \text{ mm}$$

Der Druckmittelpunkt liegt bei:

$$\frac{e}{t_{ae}} = 0,25 - \frac{cm_0}{c_a} = 0,25$$

Also ist:

$$e = 0,25 \cdot t_{ae} = 89,4 \text{ mm}$$

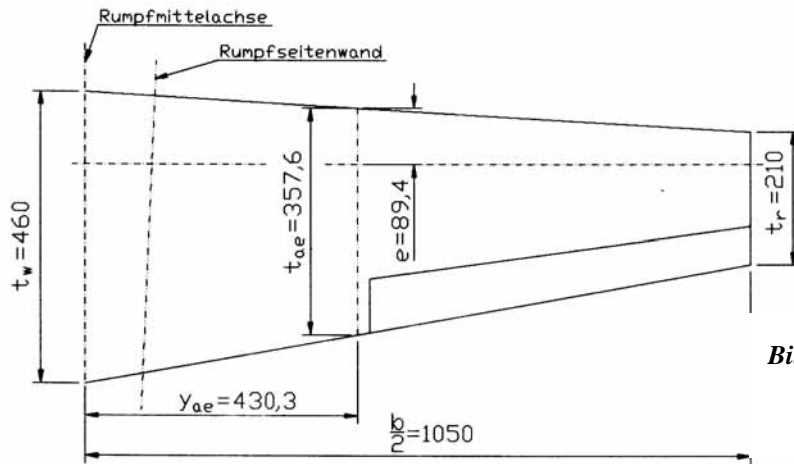


Bild 19: Zur Berechnung der Flügelfläche wird die vom Rumpferdeckte Fläche hinzugezählt.

Beim ungepfeilten Flügel entspricht dies **115 mm** hinter der Nasenspitze des Wurzelprofils.

Die Streckung ist:

$$\lambda = \frac{b^2}{F} = 6,3$$

Höhenleitwerk:

Spannweite: $b_H = 750 \text{ mm}$

Wurzeltiefe: $t_{Hw} = 280 \text{ mm}$

Wurzelprofil: NACA 0009

Randbogentiefe: $t_{Hr} = 150 \text{ mm}$

Randbogenprofil: NACA 0009

Pfeilung der t/4-Linie: $7,2^\circ$

Die Höhenleitwerksfläche ist:

$$F_H = \frac{t_{Hw} + t_{Hr}}{2} \cdot b_H = 16,125 \text{ dm}^2$$

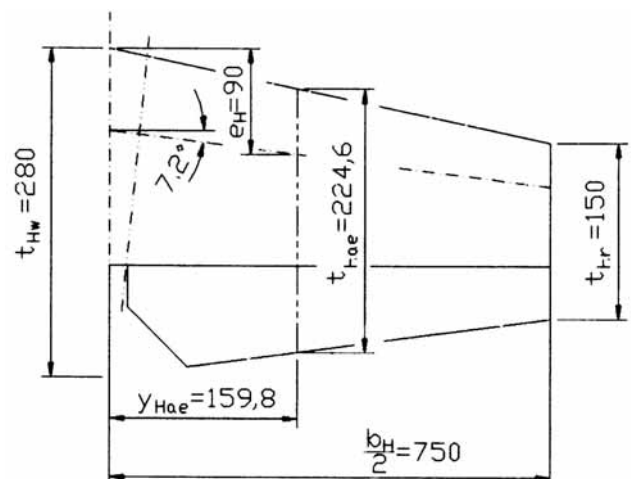


Bild 20: Beim Höhenleitwerk ist die t/4-Linie um $7,2^\circ$ nach hinten gepfeilt.

Die aerodynamisch wirksame Profiltiefe des Höhenleitwerks ist: $t_{Hae} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (t_{Hw}^2 + t_{Hr}^2)} = 224,6 \text{ mm}$

Sie liegt bei ca. 43 % der Halbspannweite:

$$\frac{y_{Hae}}{b_H / 2} = \frac{t_{Hw} - t_{Hae}}{t_{Hw} - t_{Hr}} = 42,6\%$$

$$\Rightarrow y_{Hae} = 159,8 \text{ mm}$$

Der Druckmittelpunkt des Höhenleitwerks liegt somit:

$$e_H = \frac{t_w}{4} + \sin 7,2^\circ \cdot y_{Hae} = 90,0 \text{ mm}$$

hinter der Nasenspitze des auf die Rumpfmittle projizierten Wurzelprofils.

Längsstabilität:

Folgende Größen beeinflussen die Längsstabilität:

- Höhenleitwerksfläche F_H
- Leitwerkshebelarm r_H
- Tragflügelfläche F
- aerodynamisch wirksame Profiltiefe t_{ae}
- Profilmomentenbeiwert cm_0

Um eine ausreichende Stabilität um die Querachse zu erreichen, muss die Höhenleitwerksfläche im Verhältnis zur Tragfläche groß genug sein und auch einen entsprechend langen Hebelarm hierzu aufweisen.

Eine ausreichende Längsstabilität wird erreicht, wenn das Produkt aus Höhenleitwerksfläche F_H und Hebelarm r_H in Relation zu dem Produkt aus Tragflügelfläche F und aerodynamisch wirksamer Profiltiefe t_{ae} einen bestimmten Wert annimmt.

Allgemein ist weiterhin die Druckpunktwanderung zu beachten. Da die hier verwendeten vollsymmetrischen Profile aber druckpunktstabil ($cm_0 = 0$) sind, gilt hier für den

Kennwert der Längsstabilität:

$$s = \frac{F_H \cdot r_H}{F \cdot t_{ae}}$$

Für den Leitwerkshebelarm r_H ist hier der Abstand zwischen den Druckmittelpunkten der Tragfläche und der Leitwerksfläche einzusetzen. Der Hebelarm ist: $r_H = 967 \text{ mm}$. Damit ist der Stabilitätskennwert: $s = 0,62$

Erfahrungsgemäß wird bei einem Wert zwischen 0,5 und 0,6 schon eine ausreichende Längsstabilität erreicht. Da der Schwerpunkt des Modells jedoch zugunsten eines indifferenten Flugverhaltens ca. 40 mm hinter den Druckmittelpunkt der Tragfläche verlegt wird, wurde ein entsprechend höherer Stabilitätsfaktor gewählt.

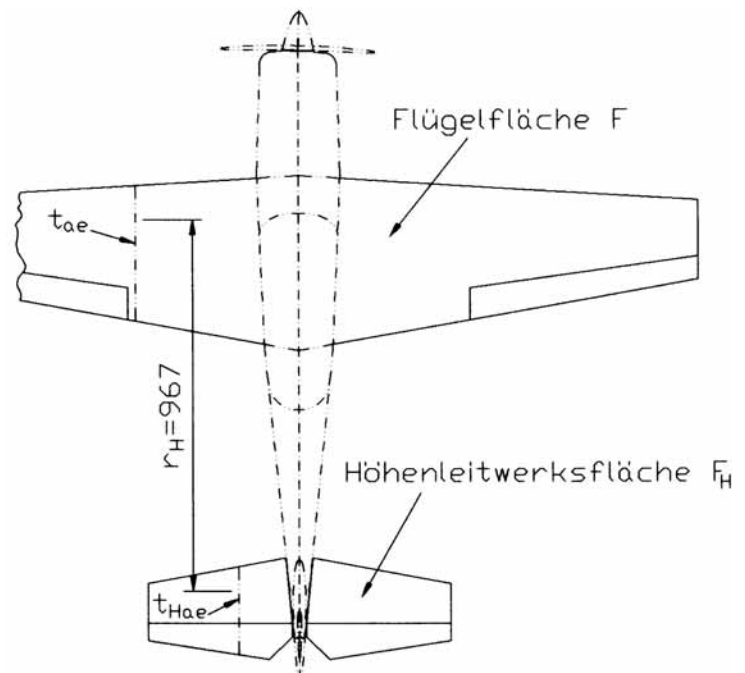


Bild 21: Kennwerte zur Bestimmung der Längsstabilität

Fluggeschwindigkeiten

Für die Betrachtung der Fluggeschwindigkeiten wird angenommen, dass der Auftrieb nur über die Tragfläche erfolgt. Zwar muss im Horizontalflug das Höhenleitwerk aufgrund der Schwerpunktlage ebenfalls Auftrieb erzeugen, dieser ist jedoch gering. Die Flächenlast des Höhenleitwerks liegt bei ca. 20 % der Tragflächenlast. Weiterhin wird angenommen, dass der Auftrieb gleichmäßig über den Tragflügel verteilt ist.

Die rein auf den Tragflügel umgerechnete Flächenlast ist:

$$G / F = 6,97 \text{ kg} / \text{m}^2$$

Die Horizontalgeschwindigkeit soll $v = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 108 \text{ km} / \text{h}$ betragen.

Die zugehörige Re-Zahl ist: $\text{Re} = 70 \cdot v \cdot \text{tae} = 750.960$

Der zugehörige Auftriebsbeiwert ist:

$$c_a \approx \frac{16 \cdot G / F}{v^2} = 0,12$$

Der Anstellwinkel hierzu kann dem c_a/α -Diagrammen aus *Bild 18* entnommen werden.

Er ist $\alpha = 1,1^\circ$

Der tatsächliche Anstellwinkel wird bei der geringen Streckung höher sein. Im Bereich niedriger Auftriebsbeiwerte $c_a < 0,2$ kann dies jedoch vernachlässigt werden.

Die Minimalgeschwindigkeit ist:

$$v_{\min} = 4 \cdot \frac{G / F}{c_{a,\max}}$$

Für $c_{a,\max} = 0,82$ ist:

$$v_{\min} = 11,7 \text{ m} / \text{s} = 42,1 \text{ km} / \text{h}$$

Die zugehörige Re-Zahl ist:

$$\text{Re} = 293.000$$

Die minimale Landegeschwindigkeit durch Erhöhung des maximalen Auftriebs bei Bodeneffekt

zu $c_{a,\max} = 1,0$ ist:

$$v_{\min} = 10,6 \text{ m} / \text{s} = 38,2 \text{ km} / \text{h}$$

Um weiterhin die Manöverlasten abschätzen zu können, werden folgende Vorgaben gemacht:

$$v_{\max} = 40 \text{ m} / \text{s} \quad (\text{für maximale Manöverlast})$$

$$c_{a,\max} = 0,83 \quad \text{bei} \quad \text{Re} = 293.000$$

Die zugehörige maximale Flächenlast ist:

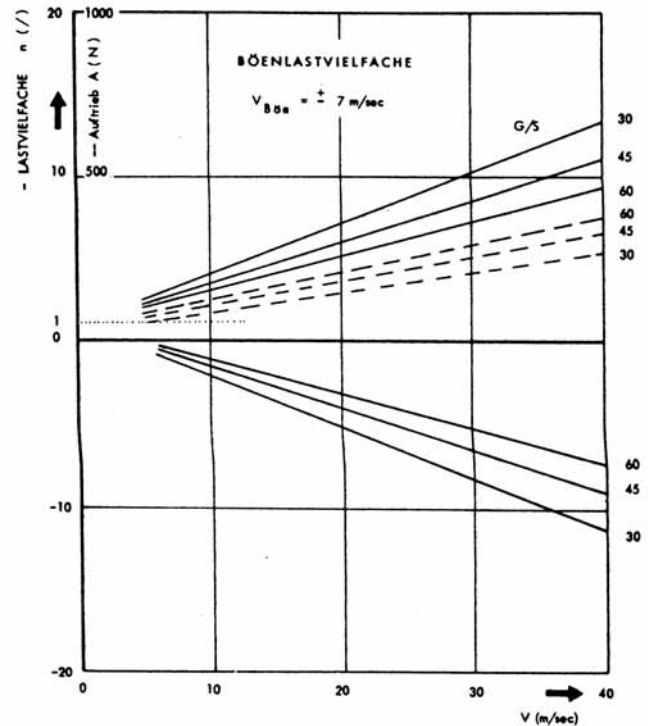
$$G / F = \frac{v_{\max}^2 \cdot c_{a,\max}}{16} = 82 \text{ kg} / \text{m}^2$$

Sie liegt bei dem **11,8**-fachen der Normallast und nach *Bild 22* über dem Böenlastvielfachen.

Bei den in *Bild 22* dargestellten Böenlastvielfachen wird die Flächenbelastung mit G/S in g/dm^2 angegeben.

Im vorliegenden Fall wird dabei bei 40 m/s ein Lastvielfaches von knapp unter 10 erreicht.

Bild 22: Böenlastvielfache /11/



4.6. Festigkeitsberechnungen

Aufgrund der geringen Abmessungen, der geringen Flügelstreckung und der geringen Massen sind die auftretenden Belastungen gering. Festigkeitsnachweise brauchen daher nur dort erbracht werden, wo die höchsten Belastungen zu erwarten sind.

Für die Tragflächensteckung wird die maximale Biegespannung im Steckungsrohr ermittelt. Ferner wird nachgewiesen, dass die Tragflügelschale bei maximaler Manöverlast allen Belastungen standhalten kann und damit ohne Holm eine ausreichende Tragfähigkeit besitzt.

Auftretende Lasten

Die maximale Belastung entspricht der in 4.5 errechneten maximalen Manöverlast.

Die maximale Auftriebskraft ist damit:

$$F_{A,\max} = 82 \text{ kg/m}^2 \cdot F \cdot g = 82 \text{ kg/m}^2 \cdot 0,7035 \text{ m}^2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 566 \text{ N}$$

Bei gleichmäßiger Auftriebsverteilung über die beiden Tragflügelhälften liegen die aerodynamischen Zentren bei:

$$y_{ae} = \pm 430,3 \text{ mm}$$

Biegespannung im Steckungsrohr:

Das Biegemoment am Übergang Rumpf/Tragfläche ist:

$$M_{B,\max} = \frac{F_{A,\max}}{2} \cdot \left(y_{ae} - \frac{B_R}{2} \right) = 91.776 \text{ Nmm} \quad \text{mit:} \quad B_R = 212 \text{ mm} \quad (\text{zugeordnete Rumpfbreite})$$

Das Widerstandsmoment des dünnwandigen 30x1-Rohres, *Bild 23*, ist:

$$W_x = \frac{\pi \cdot d_m^2 \cdot s}{4} = \frac{\pi \cdot 29^2 \cdot 1}{4} \text{ mm}^3 = 660,5 \text{ mm}^3$$

Die maximale Biegespannung ist:

$$\sigma_{b,\max} = \frac{M_{B,\max}}{W_x} = 138,9 \text{ N/mm}^2$$

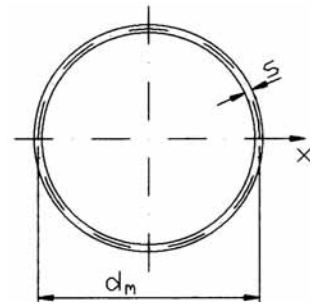


Bild 23: dünnwandiges Rohr

Die Streckgrenze für AlMgSi1/F28 ist:

$$R_{p0,2} = 200 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Damit ist der Sicherheitsfaktor:} \quad n = 1,44$$

Dimensionierung der Tragflügelschale:

Der Tragflügel wird durch Biegemomente, Querkräfte und Torsionsmomente belastet, *Bild 24*.

Die maximalen Belastungen treten dabei an der Flügelwurzel auf. Beim ungepfeilten Tragflügel sind die Torsionsbelastungen der Tragflügelschale gering. Die Querkräfte werden im Allgemeinen durch die Stege des Tragflügelholmes aufgenommen.

Im vorliegenden Fall sind statt eines Holmes lediglich Stege eingebracht. Sie verhindern ein Zusammendrücken der Schalen und dienen zur Aufnahme der Querkräfte.

Die maximale Querkraft an der Tragflügelwurzel ist das Produkt aus der Fläche des Außenflügels und der maximalen Flächenlast:

$$F_{Q,\max} = 0,3068 \text{ m}^2 \cdot 83 \text{ kg/m}^2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 249,8 \text{ N}$$

$$F_{Q,\max} = 0,3068 \text{ m}^2 \cdot 83 \text{ kg/m}^2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 249,8 \text{ N}$$

Der Stegquerschnitt beträgt hier: $A = 384 \text{ mm}^2$

Die Schubspannungen im Steg sind: $\tau = \frac{F_Q}{A} = 0,65 \text{ N/mm}^2$

Die Schubfestigkeit von Rohacell 71 ist: $\tau_{Br} = 1,3 \text{ N/mm}^2$

Der Sicherheitsfaktor ist hier: $n = 2$

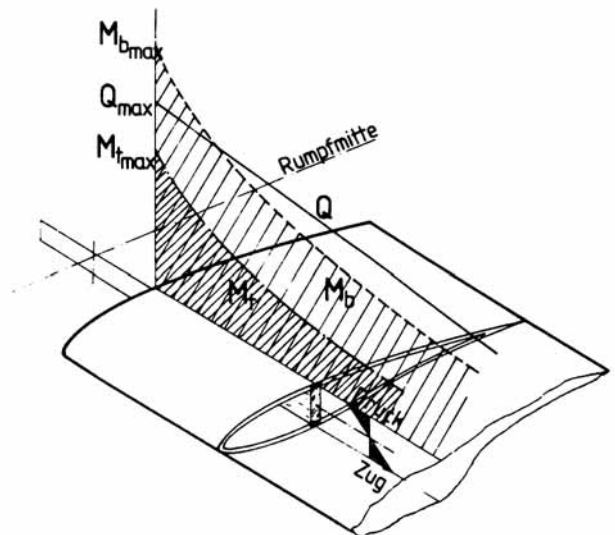


Bild 24: Belastungen im Tragflügel /11/

Beim holmlosen Tragflügel muss die Tragflügelschale die gesamten Biegebelastungen aufnehmen.

Die Biegespannungen sind: $\sigma_b = \frac{M_B}{W_x}$

Da das Widerstandsmoment W_x des Tragflügels sehr komplex zu erfassen ist, kann es durch das einer Ellipse abgeschätzt werden, die vom Tragflügelprofil eingehüllt wird: Das Zentrum der Ellipse liegt an der Stelle der maximalen Profildicke, Bild 24.

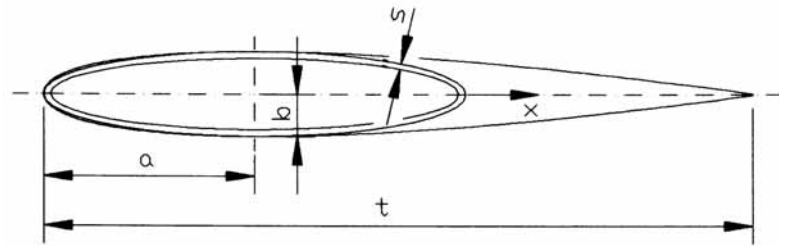


Bild 25: Abschätzung des Widerstandsmomentes

Im vorliegenden Fall ist:

$$\begin{aligned}
 t &= 440 \text{ mm} && (\text{Profiltiefe}) \\
 a &= 0,3 \cdot t = 132 \text{ mm} && (\text{große Halbachse der Ersatzellipse}) \\
 b &= 0,5 \cdot 0,12 \cdot t = 26,4 \text{ mm} && (\text{kleine Halbachse der Ersatzellipse}) \\
 s &= 0,1 \text{ mm} && (\text{Wandstärke der dünnwandigen Schale})
 \end{aligned}$$

Das Widerstandsmoment eines dünnwandigen, elliptischen Rohres ist:

$$W_x = \frac{\pi \cdot b \cdot (b + 3a) \cdot s}{4} = 875 \text{ mm}^3$$

Die maximale Biegespannung ist somit:

$$\sigma_{b,\max} = \frac{M_{B,\max}}{W_x} = 104,8 \text{ N/mm}^2$$

Die Zugfestigkeit des GfK- Laminates ist nach /1/: $\sigma_{Br} = 440 \text{ N/mm}^2$.

Damit ist der Sicherheitsfaktor: $n = 4,2$

Zu dieser Berechnung ist Folgendes zu bemerken:

Bei Verwendung eines Wabensandwiches besitzt eine Schale vorliegender Größenordnung mit der hier verwendeten Laminatkombination eine enorme Druck- und Beulfestigkeit, so dass der Nachweis gegen Beulen hier entfallen kann.

Da fertigungsbedingt das innere Decklaminat, insbesondere bei sehr dünnen Laminaten, nicht gestreckt liegt, wurde es ebenso wie der Wabekern nicht in die Berechnung der Normalspannungen in der Schale mit einbezogen.

5. Sandwichbauweisen

5.1. Das Prinzip einer Sandwichbauweise

Sandwichbauweisen werden in großflächigen Strukturen vor allem dort eingesetzt, wo die Normalbelastungen nur gering sind, durch Biegebeanspruchung, Beul- oder Knickgefahr aber eine gewisse Mindestwandstärke vorgegeben ist.

Ein Sandwich besteht aus zwei äußeren Decklagen, die mit einer Zwischenlage, dem Stützstoff, verklebt sind, *Bild 26*.

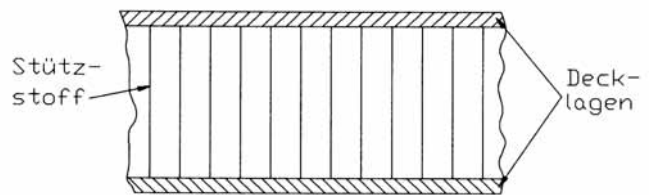


Bild 26: Prinzipaufbau eines Sandwiches

Dabei ist der Stützstoff im Allgemeinen wesentlich dicker als die beiden Decklagen, wobei die Dichte des Stützstoffes oft mehr als eine Größenordnung geringer ist.

Das Prinzip der Sandwichbauweise besteht darin, dass der relativ druckfeste, aber sehr leichte Stützstoff zwei Decklagen auf konstantem Abstand hält. Bei einer Biegebeanspruchung des Bauteils liegen dann in den dünnen Deckschichten fast ausschließlich Normalspannungen vor, während die Stützschiene Druck- und Schubspannungen erfährt. Die Funktionsweise wird klar, wenn man einen normalen Biegeträger unter Belastung betrachtet, *Bild 27*:

Das auf die Breite normierte Widerstandsmoment des Trägers ist:

$$\frac{W_z}{b} = \frac{h^2}{6}$$

Aus der Spannungsverteilung im Querschnitt wird deutlich, dass der Bereich um die neutrale Faser kaum Belastungen erfährt und somit nicht ausgenutzt werden kann, während die Randspannungen sehr hoch sind. Weiterhin treten auch schon bei geringer Belastung hohe Verformungen auf, die zumeist unerwünscht sind.

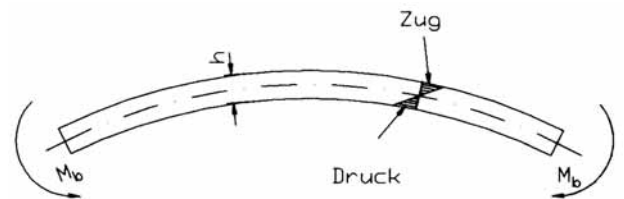


Bild 27: Biegeträger unter Biegebelastung

Trennt man nun diesen Träger entlang der Mittellinie auf und füllt zwischen beide Hälften ein druckfestes Material, das um den Faktor 20 leichter ist, so steigt das Eigengewicht des Trägers um lediglich 5 %, *Bild 28*.

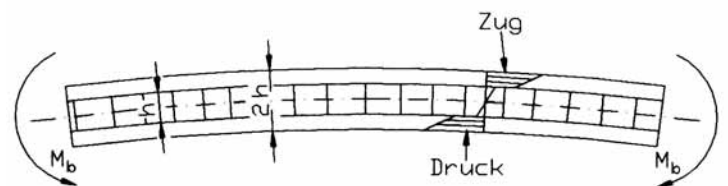


Bild 28: Sandwichträger mit Stützstoffdicke "h" unter Biegebelastung

Unter Vernachlässigung der Biegefestigkeit des Stützmaterials ist das normierte Widerstandsmoment des so aufgefüllten Trägers:

$$\frac{W_z}{b} = \frac{(2 \cdot h)^2}{6} - \frac{h^2}{6} = 3 \cdot \frac{h^2}{6}$$

Das bedeutet: Bei einem Gewichtszuwachs von nur 5 % stieg die Biegefestigkeit auf 300 %.

Erhöht man nun die Dicke der Stützschiicht auf das Vierfache und vermindert dabei gleichzeitig die Dicke der Decklagen auf jeweils die Hälfte, so beträgt das Gewicht nur noch das 0,7- fache des ersten Trägers, *Bild 29*.

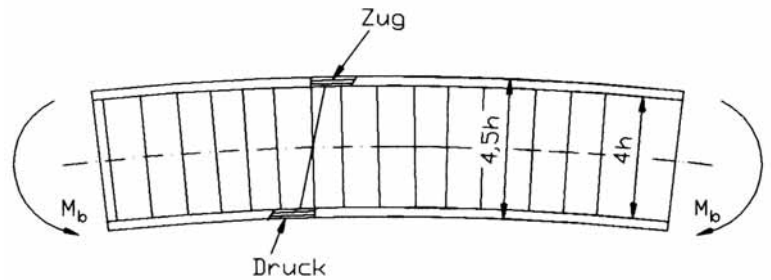


Bild 29: Sandwichträger mit großer Stützdicken und verringerter Decklagenstärke

Das normierte Widerstandsmoment dieses Sandwichträgers mit erhöhter Stützdicken und verminderter Decklagenstärke ist:

$$\frac{W_z}{b} = \frac{(4,5 \cdot h)^2}{6} - \frac{(4 \cdot h)^2}{6} = 4,25 \cdot \frac{h^2}{6}$$

und damit mehr als das 4-fache des ersten Trägers.

Es fällt weiterhin dabei auf, dass das Spannungsgefälle innerhalb des Trägers kaum noch zu erkennen ist, sodass das Material der Deckschichten wesentlich besser ausgenutzt werden kann.

Verringert man auf diese Weise weiter die Wandstärke, so können die anfangs geringen Normalbelastungen eine Mindestwandstärke begrenzen. Im Allgemeinen ist die Mindestwandstärke der Deckschichten jedoch durch punktuelle Lasten (Schlag, Anfassen) begrenzt.

5.2. Übliche Materialkombinationen

Für die Realisierung einer Sandwichbauweise sind bei Flugmodellen unterschiedliche Kombinationen von Decklagen- und Stützdicken Werkstoffen möglich.

Decklagen

Für die Decklagen stellt sich insbesondere die Frage nach der Wahl des richtigen Fasertyps. *Tabelle 1* gibt eine Aufstellung über typische Eigenschaften relevanter Fasern:

Kennwerte	Einheit	Glasfaser R/S-Glas	Kohlefaser HT-Typen	Aramid- faser	PE-Faser
Zugfestigkeit	[GPa]	4,5	3,1	2,9	2,9
E-Modul	[GPa]	86	233	69	125
Bruchdehnung□	[%]	4,8	1,3	3,8	3,1
Dichte	[g/cm ³]	2,5	1,78	1,42	0,97
Thermische Ausdehnung	10 ⁻⁶ /K	4	-0,4	-4,0	< -9

Tabelle 1: Typische Eigenschaften verschiedener Faserarten, die in Faser-Kunststoff-Verbunden Verwendung finden:

Die Eigenschaften der Decklage werden weiter in erheblichem Maße vom verwendeten Matrixwerkstoff mitbestimmt.

Im Flugmodellbau kommen fast ausschließlich Epoxydharze zum Einsatz. Sie weisen neben besseren mechanischen Eigenschaften gegenüber Polyesterharzen einen deutlich geringeren Härtingsschwund auf. Dadurch wird die Verzugsfahr vermindert und eine bessere Maßhaltigkeit der Bauteile erreicht. Der höhere Preis der Epoxydharze spielt wegen der geringen Mengen bei Flugmodellen kaum eine Rolle.

Stützstoffe

Der Stützstoff eines Sandwichverbundes soll bei sehr geringem Gewicht eine ausreichende Druckfestigkeit aufweisen. *Bild 30* stellt einige Beispiele von Sandwichverbunden mit unterschiedlichen Stützstoffen dar:

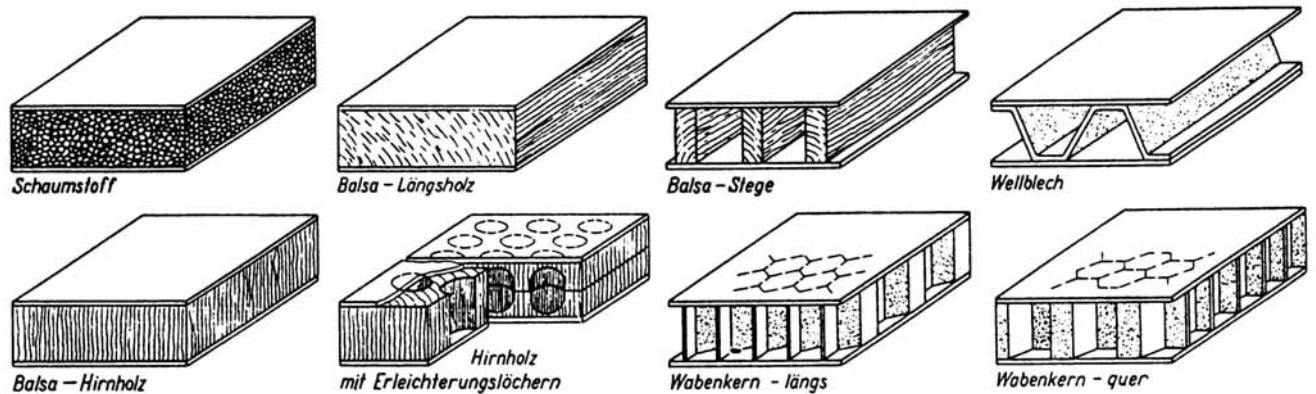


Bild 30: Unterschiedliche Kernformen für einen Sandwichaufbau /2/

Während die Versteifung mit Profilen im vorliegenden Fall wenig sinnvoll erscheint, sind Schaumstoffe, Holz und Waben gut anwendbar und mehrfach erprobt.

Schaumstoffe:

Einer der leichtesten Schaumstoffe ist hier das Styropor. Es erfordert wegen seiner geringen Druckfestigkeit eine relativ dicke äußere Decklage mit Schichtstärken ab 0,2 mm und ist weniger dazu geeignet, als Vollsandwich im Unterdruck verklebt zu werden.

Styropor eignet sich aber gut zur lokalen Verstärkung größerer Flächen wie Rumpfsseitenwände und Seitenleitwerksflossen. Dabei ist es als Sandwich relativ einfach und kostengünstig naß in naß zu verarbeiten und bringt deutliche Steifigkeitsvorteile gegenüber Vollaminaten. Insbesondere das Dröhnen großvolumiger Rümpfe von Motorflugmodellen kann dadurch wirkungsvoll vermieden werden. Der Gewichtsvorteil eines Styropor-Sandwichs ist allerdings gering.

Feinkörnige Schaumstoffe wie das Rohacell weisen eine höhere Druckfestigkeit auf und können im Unterdruck verklebt werden. Bei äußeren Decklagen unter 0,15 mm neigen Bauteile bei festerem Zufassen aber auch hier zur Dellenbildung. Einige Modelle, die mit äußeren Decklagen von nur 0,05 mm Stärke hergestellt wurden, wiesen zwar eine ausreichende Festigkeit bei geringem Gewicht auf, durften aber nur mit "Samthandschuhen" angefasst werden, da sie sonst nach nur kurzer Gebrauchsdauer völlig zerdellt waren.

Die Sandwichbauweise mit Rohacell oder Conticell als Kernwerkstoff wird unter anderem im Segelflugzeugbau angewendet. Bei etwas dickeren Decklagen aus GFK wird dabei eine sehr hohe Oberflächengüte erzielt. Allerdings ist diese Bauweise dann gewichtsspezifisch anderen Bauweisen unterlegen.

Holz

Wegen seines geringen Gewichtes bei guter Festigkeit ist besonders Balsaholz als Stützmaterial in Sandwichverbunden geeignet. Aufgrund seiner teilweise sehr unterschiedlichen Qualitäten (die Dichte kann zwischen 70 kg/m^3 und 400 kg/m^3 variieren) müssen die verwendeten Hölzer aber genau ausgesucht werden.

1 mm dickes Balsaholz mit einer Dichte um 120 kg/m^3 hat sich in Verbindung mit dünnsten Decklaminaten von nur 0,05 mm Stärke beim Bau von Tragflächen gut bewährt.

Für sphärisch gewölbte Flächen ist Holz als Stützstoff allerdings nicht geeignet.

Wabenkerne

Wabenkerne aus Aluminium werden als Stützmaterial im Flugzeugbau bereits seit Ende der fünfziger Jahre eingesetzt. Für Kunststoffverbunde eignen sich jedoch besser Polyamid- Wabenkerne, die leichter sind und sich besser mit dem Verbundkunststoff der Decklagen verkleben lassen. Sie bestehen aus mit Phenolharz getränktem Aramidpapier und sind in unterschiedlichen Dichten und Materialstärken erhältlich. Die Polyamid-Wabe von R&G mit einem Zelldurchmesser von 3,2 mm, einer Dicke von 2 mm und einem Raumgewicht von 29 kg/m³ ist das zur Zeit leichteste und dünnste Wabenkernmaterial, das am Markt erhältlich ist.

Für die Steifigkeitsanforderungen bei Flugmodellen wäre sogar ein noch dünneres Wabenmaterial ausreichend und wünschenswert, dieses ist aber zurzeit nicht verfügbar. Bei Verwendung der R&G- Wabenkernen sind äußere Decklagen von ca. 0,1 mm Stärke notwendig, um ausreichend dichte Decklagen zu erzielen und ein Ausbeulen des Laminates innerhalb der Sechseckstruktur der Wabe zu vermeiden. Für die innere Decklage reichen dann wesentlich dünnere Gewebe.

In dieser Kombination können sehr leichte Bauteile mit weitaus höherer Druck- und Beulsteifigkeit gegenüber den vorab genannten Kombinationen hergestellt werden. Gewichts- und steifigkeitsspezifisch anderen Stützstoffen weit überlegen sind Wabenkerne allerdings auch etwas teurer und erfordern spezielle Kenntnisse in der Verarbeitung.

5.3. Werkstoffauswahl

Insbesondere beim Leichtbau haben die auftretenden Größenordnungen der Belastungen und die Belastungsarten einen entscheidenden Einfluss auf die Werkstoffauswahl.

Eine Auswahl des richtigen Fasertyps kann sinnvoller Weise mit Hilfe normierter Gütezahlen geschehen. Sie geben Aussagen darüber, um welchen Faktor sich ein Werkstoff gegenüber einem Bezugswerkstoff unterscheidet:

Eigenschaft	Al-Leg.	GfK	CFK HM	CFK HT	AFK
statische Festigkeit <input type="checkbox"/>	1	1,94	2,19	2,94	2,12
Längssteifigkeit <input type="checkbox"/>	1	0,5	2,27	1,77	1,23
Torsionssteifigkeit <input type="checkbox"/>	1	0,32	1,47	1,12	0,3
Knickstabilität <input type="checkbox"/>	1	0,81	1,95	1,77	0,73
Beulstabilität <input type="checkbox"/>	1	1	1,84	1,76	0,9
Arbeitsaufnahmefähigkeit <input type="checkbox"/>	1	8,4	2,1	4,5	11,0
Schlagzähigkeit	1	0,75	0,2	0,2	1,02
Schwingfestigkeit <input type="checkbox"/>	1	1,7	2,8	3,2	2,33

Tabelle 2: Auf Aluminium normierte Gütezahlen einiger quasiisotroper Lamine /10/

In *Tabelle 2* ist deutlich zu erkennen, daß CFK zwar deutlich höhere Steifigkeitswerte aufweist als GfK, die Arbeitsaufnahmefähigkeit und die Schlagzähigkeit aber deutlich geringer sind. Unschlagbar in Bezug auf Schlagzähigkeit ist AFK. Dort, wo die Steifigkeitsanforderungen gering sind, aber die Schlagzähigkeit eine wichtige Rolle spielt, sind Glas- oder Aramidfasern besser geeignet als Kohlenstofffasern.

Wegen ihres deutlich geringeren Preises und ihrer guten Verarbeitbarkeit werden dabei zumeist Glasfasergewebe eingesetzt. Speziell bei Anwendung der Wabensandwichbauweise werden

erfahrungsgemäß für den vorliegenden Anwendungsfall selbst bei dünnsten Laminaten ausreichend beulsteife Flächen erzielt.

Selbst bei GfK- Decklaminaten mit einer Stärke von nur 0,05 mm in Verbindung mit der dünnsten verfügbaren Wabe von 2 mm Wandstärke wird ein Motormodellrumpf der geplanten Größe die vielfache Beulsteifigkeit gegenüber einem gleichen Rumpf ohne Sandwich mit einer Laminatstärke von 0,32 mm aufweisen.

(Zur Veranschaulichung: Ein 0,05 mm dickes Laminat entspricht etwa dem aus einer Lage 49 g/m^2 -Glasgewebe, das 0,32 mm dicke Laminat entspricht dann etwa 2 Lagen 161 g/m^2 -Glasgewebe bei einem Faservolumenanteil von ca. 40%.)

Die Dimensionierung der Wandstärken im vorliegenden Anwendungsfall ist daher eher fertigungstechnisch als festigkeitsbedingt nach unten begrenzt. Somit ist für eine Auswahl des Faserwerkstoffes eine genauere Betrachtung der dünneren Gewebe, die für den Modellbauer verfügbar sind, ratsam.

Glasgewebe

Es hat sich gezeigt, dass mindestens 2 Lagen des 49 g/m^2 - Gewebes notwendig sind, um ein ausreichend dichtes Decklaminat herstellen zu können und um ein Ausbeulen des Laminates innerhalb des 3,2 mm-Sechsecks der Wabe weitestgehend ausschließen zu können. Die Laminatstärke ist dann etwa 0,1 mm.

Bei Verwendung des 2 mm- Wabekerns und einem inneren Decklaminat aus einer Lage 49 g/m^2 -Gewebe wird bei allen vorgesehenen Bauteilen eine mehr als ausreichende Beulsteifigkeit erzielt, die z. B. alle weiteren Versteifungen im Rumpf erübrigt. (Es würde sogar schon ein inneres Decklaminat aus einer Lage 25 g/m^2 -Gewebe hierzu genügen.)

Eine ähnliche Laminatstärke wird mit dem 105 g/m^2 Köpergewebe als äußeres Decklaminat erzielt. Wegen seiner Bindungsart weist dieses Gewebe eine sehr gute Drapierfähigkeit auf und ist deshalb besonders gut an sphärisch gewölbten Flächen zu verarbeiten. Weiterhin ist das Gewebe sehr dicht gewoben und zeichnet sich deshalb durch eine geringe Harzaufnahme aus. Das in Versuchen ermittelte Flächengewicht eines einlagigen Laminates aus 105 g/m^2 -Gewebe lag nur geringfügig über dem des zweilagigen Laminates aus 49 g/m^2 -Gewebe.

Es ist jedoch zu beachten, dass ein mehrlagiges Laminat bei gleicher Laminatstärke bessere und insbesondere homogenere Festigkeitseigenschaften aufweist als das einlagige Laminat.

Kohlenstofffasergewebe

Eine weiterer Werkstoff, der sich hier für das äußere Decklaminat anbietet, ist das 93 g/m^2 -Kohlefasergewebe. Es ist eines der dünnsten Kohlenstofffasergewebe, die überhaupt verfügbar sind.

Bei 40% Faservolumenanteil werden hiermit Laminatstärken von ca. 0,13 mm erzielt. Für höhere Ansprüche ist dieses sicherlich eine sehr gute Werkstoffwahl, man bedenke jedoch, daß man die sicherlich deutlich höhere Steifigkeit, die man aber bei dem vorliegenden Anwendungsfall gar nicht benötigt, mit einem deutlich höheren Materialpreis und höherer Schlagempfindlichkeit bezahlt.

Auch einen Gewichtsvorteil wird man hierbei kaum erzielen können, da das etwas dicker liegende Kohlefasergewebe seinen geringen Gewichtsvorteil gegenüber dem dünneren GfK- Laminat wegen der höheren Harzaufnahme nicht halten können wird.

Aramidfasergewebe

Eine weitere Möglichkeit ist, für das äußere Decklaminat das 61 g/m^2 - Aramidgewebe zu wählen. Bei 40% Faservolumenanteil ergibt sich eine Laminatstärke von ca. 0,11 mm. Hier ergibt sich ein deutlicher Gewichtsvorteil gegenüber den anderen Kombinationen, bei geringfügig erhöhter Steifigkeit

gegenüber dem Glasgewebe und wesentlich erhöhter Schlagfestigkeit gegenüber dem Kohlenstofffasergewebe.

Man bedenke jedoch hierbei die Schwierigkeiten, die bei der Verwendung von Aramidgeweben auftreten können. Wegen der schwierigen mechanischen Bearbeitbarkeit und der hohen Feuchtigkeitsaufnahme ist zu erwarten, dass das Aramidgewebe an späteren Durchbruchstellen und an allen Rändern durch Glasgewebe ersetzt werden muss. Dies verkompliziert den Laminiervorgang und bringt nur noch bei sehr großflächigen Bauteilen Gewichtsvorteile.

Tabelle 3 gibt Vergleichswerte der verschiedenen Sandwichaufbauten wieder, wobei nur das äußere Decklaminat variiert wurde.

Bei der Berechnung wurden folgende Werte zugrunde gelegt:

- Faservolumengehalt aller Lamine 40 %
- jeweils 30 g/m² zusätzliches Klebharz zum Verkleben des Wabenkerns bzw. der inneren Decklage
- Materialpreise: Nettopreise nach /1/

äußere Decklage				
Gewebe	2 x 49 g/m ² - Glasgewebe	105 g/m ² - Glasgewebe	93 g/m ² - Kohlegewebe	61 g/m ² - Aramidgewebe
Faserdichte [g/cm³]	2,6	2,6	1,78	1,45
Gewebedicke [mm]	0,038	0,040	0,052	0,042
theoreth. Harzaufnahme bei 40 % Faservolumenanteil [g]	62,7	66,0	85,8	69,3
Laminatdicke [mm]	0,095	0,100	0,130	0,105
Laminatgewicht [g/m²]	160,7	171,0	178,8	130,3
Sandwich (gesamt)				
äußere Decklage	wie oben!			
Stützstoff	R&G Polyamid-Wabenkern 2 mm			
inneres Decklaminat	49 g/m ² - Glasgewebe			
Gesamtgewicht [g/m²]	368,7	379,0	386,8	338,3
Materialgesamtpreis [DM/m²]	100,61	99,38	128,50	185,88
Bemerkungen (Decklaminat)	quasiisotropes Laminat, geringe Rissempfindlichkeit	dichtes, flaches Gewebe, sehr gut zu verarbeiten	hohe Steifigkeit, geringe Schlagzähigkeit	sehr gute Schlagzähigkeit, schwierige Verarbeitbarkeit
12.92/HF	Durchschlagen des Wabenkerns auf der Außenseite möglich		kein Durchschlagen des Wabenkerns auf der Außenseite mehr	

Tabelle 3: Vergleich von Wabensandwichaufbauten mit unterschiedlicher Decklage

Matrixwerkstoff

Die Wahl des Matrixwerkstoffes muss sorgfältig auf das Fertigungsverfahren und die Fertigungsbedingungen abgestimmt werden. Bei der Herstellung sehr dünner Lamine im Handlaminierverfahren ist darauf zu achten, dass das Harzsystem eine sehr geringe Viskosität aufweist und auch noch in dünnsten Schichten gut durchhärtet. Dies ist besonders wichtig, wenn nicht die Möglichkeit besteht, Bauteile warm zu härten.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die teilweise sehr unterschiedliche Toxizität verschiedener Harzsysteme. Da bei großflächigen Laminaten eine sehr hohe Ausdünstung erfolgt, ist nur die Anwendung lösemittelfreier Harzsysteme empfehlenswert. Zwar ist es möglich, durch Beimischung von Azeton, Spiritus oder Methanol die Viskosität deutlich herabzusetzen, doch sollte eine Verdünnung des Harzes aus gesundheitlichen Gründen, wenn überhaupt, besser durch Reaktivverdünner erfolgen.

Im vorliegenden Fall wurden das R&G-Epoxydharz L mit dem Aktiv-Verdünner H und dem Härter L bzw. dem Härter VE 3261 sowie alternativ das Harzsystem R&G-Epoxydharz LF mit dem Härter LF3 erprobt. Mit diesen Systemen wurden in allen Fällen gute Ergebnisse erzielt. Sie sind niedrigviskos und benetzen die Verstärkungsfasern sehr gut. Das System LF weist mit Härter LF3 eine sehr lange Topfzeit auf. Daher kann es vor dem Anmischen im Wasserbad auf ca. 30°C erwärmt werden und somit die Viskosität weiter herabgesetzt werden, ohne dass ein vorzeitiges Angelierren zu befürchten ist. Außerdem weist das System LF, besonders bei Warmhärtung, eine bessere Wärmeformbeständigkeit auf. Für Flugmodelle ist dies dann bedeutsam, wenn die Gefahr besteht, dass die Bauteile z.B. im Sommer im warmen Auto auf über 55°C erwärmt werden und sich dann verziehen können. Die folgenden *Tabelle 3* *Tabelle 4* beschränken sich auf die Wiedergabe der wichtigsten Daten der beschriebenen Harzsysteme. Eine genaue Beschreibung der Harzsysteme ist /1/ zu entnehmen.

Harzsysteme	Einheit	EP-Harz L Härter L	EP-Harz L Härter VE 3261	EP-Harz LF Härter LF3
Dichte	g/cm ³	-	-	1,15
Biegefestigkeit	MPa	105	122	115
Zugfestigkeit	MPa	65	70	73
Druckfestigkeit	MPa	118	123	129
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	25	16,5	50
Biege-E-Modul	MPa	3,3*10 ³	3,6*10 ³	3,3*10 ³

Tabelle 4: Daten der unverstärkten, gehärteten Harze /1/

GFK	Einheit	EP-Harz L Härter L	EP-Harz L Härter VE 3261	EP-Harz LF Härter LF3
Biegefestigkeit	MPa	509	485	492
Zugfestigkeit	MPa	440	-	485
Druckfestigkeit	MPa	326	380	325
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	223	-	-
Biege-E-Modul	MPa	2,7*10 ⁴	2,2*10 ⁴	2,1*10 ⁴
Interlaminare Scherfestigkeit	MPa	39	44	38

Tabelle 5: Daten der unverstärkten und der verstärkten Harze /1/

6. Fertigung

6.1. Vakuumtechnik als Voraussetzung zur Herstellung von GfK- Wabensandwichbauteilen

Grundvoraussetzung für die Herstellung von Wabensandwichbauteilen ist, dass Wabekern und Decklage zuverlässig fest miteinander verklebt werden können. Da nur die Stege des Wabekerns mit der Decklage in Kontakt treten, ist die Klebefläche weniger als 10 % der Gesamtfläche. Eine nur unvollständige Verklebung würde hier sehr schnell zum Delaminieren von Decklage und Wabekern führen. Daher muss der Wabekern beim Verkleben ganzflächig auf die Decklage gepresst werden. Das Verpressen kann entweder mit elastischer Gegenform geschehen, besser und zuverlässiger, aber auch einfacher ist jedoch das Verkleben im Vakuum.

Dabei werden die zu verklebenden Bauteile in eine luftdichte Folie verpackt, die ringsherum abgedichtet wird. Mit einer Vakuumpumpe wird in dieser großen "Tüte" nun ein Unterdruck erzeugt. Damit gewährleistet ist, dass die Folie an allen Stellen gut anliegt, wird die Folie besonders im Bereich von Vertiefungen großzügig in Falten gelegt.

Der Unterdruck ist dabei die Differenz zwischen dem Umgebungsdruck und dem Absolutdruck in dem Folien-schlauch. Mit diesem Unterdruck werden nun der Wabekern und das Decklaminat verpresst, *Bild 31*.

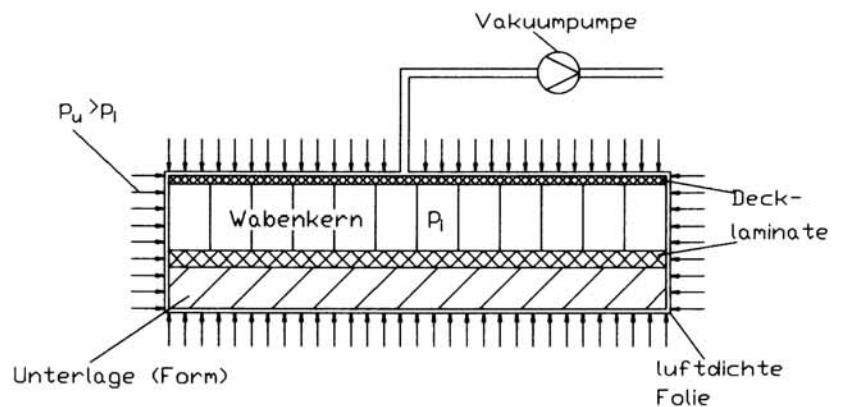


Bild 31: Beim Verkleben im Vakuumverfahren wird der Umgebungsdruck ausgenutzt. Bei einem Unterdruck von 0,8 bar wirkt pro Quadratmeter eine Presskraft von 80000 N.

Bei Anwendung der Vakuumtechnik sind jedoch einige Besonderheiten zu beachten, die hier herausgestellt werden sollen.

Formgestaltung

Ein Verpressen findet nur an den Stellen statt, an denen der Wabekern am Decklaminat anliegt und die Folie wiederum auf dem Wabekern anliegt. Beim Überspannen besonders an Ecken und Kanten können daher leicht Fehlstellen entstehen. Außerdem treten beim Überspannen hohe Belastungen in der Folie auf, die zu Beschädigung der Folie oder auch zu einem Verzug der Form führen können.

Daher ist schon bei der Auslegung von Bauteilen darauf zu achten, dass Ecken und Kanten weitestgehend vermieden werden. Sind sie konstruktionsbedingt notwendig, sollte überlegt werden, ob im Bereich der Kanten oder Ecken eine Versteifung durch das Wabensandwich notwendig ist oder auch ein Volllaminat ausreicht, das von der Kante ausgehend in das Sandwich hinein abgestuft wird.

Bild 32 zeigt beispielhaft die Gestaltung eines Bauteils im Kantenbereich: Eine Versteifung durch Sandwichbauweise ist nur auf großen Flächen erforderlich. Da Kanten ohnehin eine große

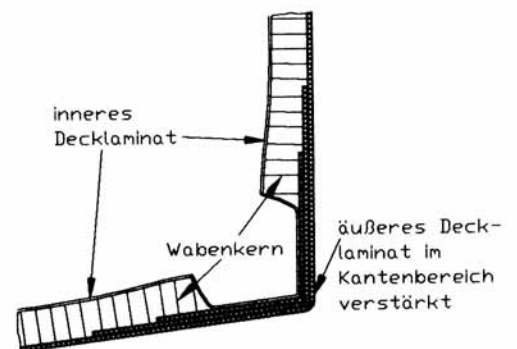


Bild 32: Gestaltung des Bauteils im Kantenbereich

Versteifungswirkung besitzen, kann in diesen Bereichen das Sandwich besser ausgespart werden.

Ecken und Kanten müssen aber auch am Formenrand außerhalb des eigentlichen Bauteilbereiches vermieden werden, wenn hier der Foliensack anliegt. Daher kann bei Formen, die im Vakuum eingesetzt werden sollen, auch im Allgemeinen kein versteifender Hinterbau aus Rippen und Spanten angebracht werden. Die Form sollte hier eine ausreichende Wandstärke besitzen, die je nach Größe der Form mindestens 3-5 mm betragen sollte.

Bei GFK- Formen sollte das Formenlaminat mit einem feinen Gewebe auf der Rückseite abschließen, eventuell kann zusätzlich Formenharz aufgetragen werden, damit auch die Rückseite möglichst glatt ist und keine scharfen Ecken und Kanten den Folienschlauch beschädigen. Eine Alternative hierzu ist, den Formenrand sehr breit auszuführen und die Folie dann am Formenrand abzudichten, anstatt die gesamte Form im Vakuum einzusetzen. Dieses Verfahren eignet sich aber vorwiegend für große Formen. Hier können dann auch Silikontücher, wie sie vorzugsweise zur Bauteilherstellung bei höchsten Anforderungen in der Luft- und Raumfahrt angewendet werden, zum Einsatz kommen.

Einsetzen der Formen in das Vakuum

Kleinere Formen, wie sie beim Modellbau üblich sind, werden vorzugsweise komplett in den Folienschlauch geschoben. Hierzu eignet sich sehr gut der R&G Folienschlauch.

Ebenso kann ein Folienschlauch aber auch aus PE-Folie, wie sie in Baumärkten erhältlich sind, selbst hergestellt werden. Dabei ist jedoch auf die Folienstärke zu achten, die bei ca. 0,1 mm liegen sollte. Dünne Folien unter 0,5 mm reißen zu schnell ein und führen damit zu kleinen Undichtigkeiten. Dickere Folien über 0,15 mm sind zu steif und lassen sich nur unzureichend in Falten legen.

Bei komplizierten neuen Formen empfiehlt es sich, diese vor dem ersten Einsatz einmal probeweise im Folienschlauch einzusetzen, um auf diese Weise eventuell verbliebene scharfe Ecken und Kanten ausfindig zu machen, aber auch um schwierige Stellen aus zu kunden, an den die Folie besonders stark in Falten gelegt werden muss, damit sie auch wirklich überall anliegt. Wichtig ist in jedem Fall, dass der Folienschlauch ausreichend groß bemessen wurde. Bei Rumpfformen ist dies mindestens die 1,5 fache Länge der Rumpfform selbst.

Bevor die Form in den Folienschlauch geschoben wird, muss der Pumpenschlauch angeschlossen werden. Dies kann mit der R&G Schlauchverbindung geschehen. Eine andere Möglichkeit ist die, den Pumpenschlauch auf einer Länge von ca. 200 mm vom Ende zu perforieren, und dieses Stück mit Abreißgewebe zu umwickeln. Das Abreißgewebe wird mit Kreppband fixiert und der Schlauch von einem offenen Ende in den Folienschlauch geschoben und anschließend mit diesem mit Silikon- oder

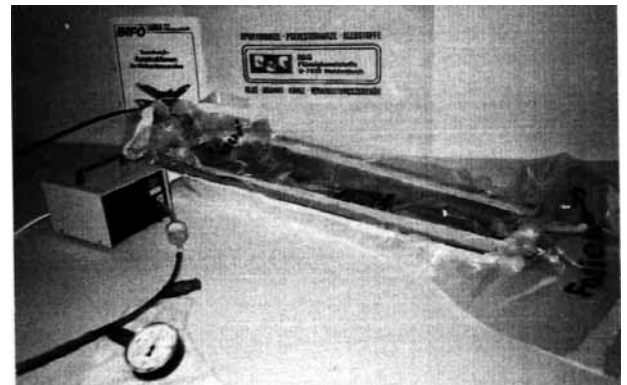


Bild 33: Kleine Formen werden einfach in einen Folienschlauch geschoben, der dann lediglich an den beiden offenen Enden mit einer Silikonnaht abgedichtet werden muss /16/.



Bild 34: Damit sich die Vakuumfolie nicht am Schlauchende festsaugt, wird das Schlauchende perforiert und mit Abreißgewebe umwickelt.

Acryldichtmittel verschlossen. Bei dieser Methode wird verhindert, dass sich insbesondere bei der Verwendung dünner Folien die Folie am Schlauchende festsaugt und eventuell auch dort einreißt. Wenn die Form in den Foliensack geschoben ist, wird dieser vollständig abgedichtet und die Luft abgesaugt.

Bei Vakuumpumpen mit geringer Förderleistung geschieht das Absaugen zweckmäßigerweise zuerst mit einem Staubsauger. Dabei muss gleichzeitig die Folie in Falten gelegt werden. Bei tiefen und unförmigen Formen wie z.B. bei Rumpfformen ist teilweise ein Korrigieren der Faltenbildung notwendig. Anschließend wird der Pumpenschlauch auf die Vakuumpumpe umgesteckt und der Unterdruck mit einem angeschlossenen Manometer kontrolliert. Er sollte mindestens 0,5 bar betragen.

Erforderliche Ausstattung für die Anwendung der Vakuumtechnik

Die Anwendung der Vakuumtechnik kann mit recht einfachen Mitteln und geringem Investitionsaufwand geschehen. Die Firma R&G bietet zwei Vakuumpumpen an, die als Dauerläufer ausgelegt sind, und speziell für die Herstellung von Vakuumlaminaten und Sandwichbauteilen geeignet sind:

Die Vakuumpumpe P1 ist eine einfache Membranpumpe mit einer Vakuumleistung von ca. 75 %. Dieses ist für die Herstellung von Sandwichbauteilen völlig ausreichend. Der Vorteil solch einer Pumpe sind der geringe Anschaffungspreis, die geringe Leistungsaufnahme und die geräuscharme Arbeitsweise. Ein Nachteil kann die geringe Förderleistung der Pumpe sein. Wenn das Vakuumsystem Leckstellen aufweist, fällt dadurch der Unterdruck relativ rasch ab, was zu unvollständigen Verklebungen führen kann. Für kleinere Formen im Modellbau ist jedoch die Leistung dieser Pumpe ausreichend.

Für den professionellen Einsatz besonders bei größeren Formen, ist die Vakuumpumpe P2 geeignet. Sie hat eine wesentlich höhere Förderleistung und erreicht ein relatives Endvakuum von -915 mbar. Dabei ist die Leistungsaufnahme noch relativ gering. Neben einer Vakuumpumpe sind noch ein Filter für die Pumpe, Pumpenschlauch sowie ein Manometer und verschiedene Verbindungselemente wie in /1/ aufgeführt, notwendig.

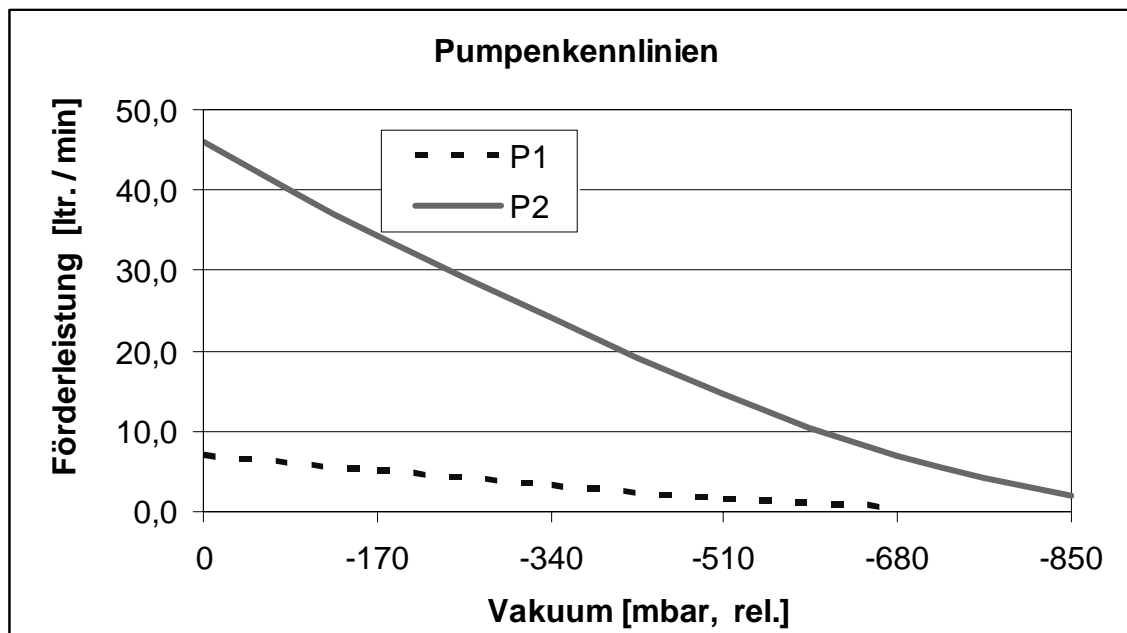


Bild 35: Kennlinien der Pumpen P1 und P2: Die Pumpen sind als Dauerläufer konzipiert. Je besser der Vakuumsack abgedichtet ist, umso geringer ist das benötigte Fördervolumen, sodass ein höherer Unterdruck erreicht wird.

6.2. Formenbau

Die Herstellung aller GfK- Bauteile erfolgte in Negativformen. Die Negativformen selbst entstanden durch Abformen von Positivkernen. Dazu wurde jedes Bauteil aus geeigneten Werkstoffen (Holz, Styropor, GfK) so hergestellt, dass es die äußere Form des späteren Bauteils aufwies und konnte dann nach entsprechender Oberflächenbehandlung abgeformt werden.

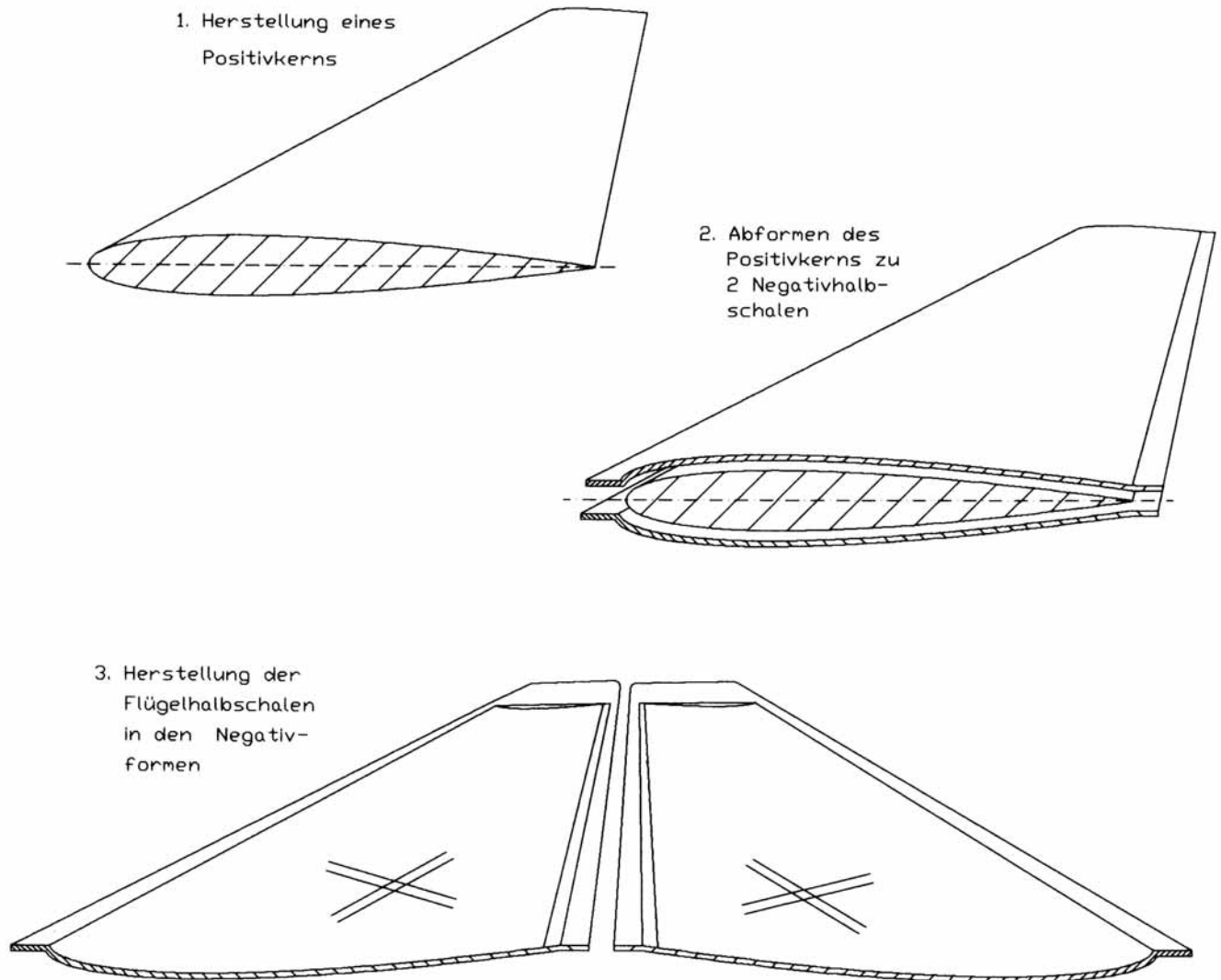


Bild 36: Darstellung des Fertigungsprinzips

Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens gegenüber den direkten Herstellungsverfahren von Negativformen ist, dass ein Positivkern mehrmals abgeformt werden kann, wenn man mehrere Negativformen benötigt oder eine Negativform beschädigt wird. Gegenüber einer CNC- gefrästen Negativform aus Aluminium oder Kunststoff sind die Formkosten dabei um ein Vielfaches geringer. Die Formgenauigkeit hängt dabei allerdings von der Formgenauigkeit des Positivkernes ab. Wenn dieser auf konventionelle Weise hergestellt wurde, sind die Toleranzen zwar deutlich höher als bei einer CNC-Fertigung, für die meisten Anwendungsfälle jedoch mehr als ausreichend. Eine genaue Vorgehensweise beim Formenbau ist in /1/6/10/11/ beschrieben.

Aufbau der Negativformen

Der Aufbau der Negativformen erfolgte nach /1/ mit R&G Alu- Formenharz, einer Kopplungs-schicht aus einem Harz-Baumwollflocken-Glasfasergemisch und einem je nach Formengröße bis zu 3 mm dicken GFK-Laminat.

Bild 37: Der Querschnitt der Negativformen. Die Kopplungsschicht verhindert, dass zwischen Deckschicht und Laminat Luftblasen entstehen und erhöht damit wesentlich die Lebensdauer der Formen.

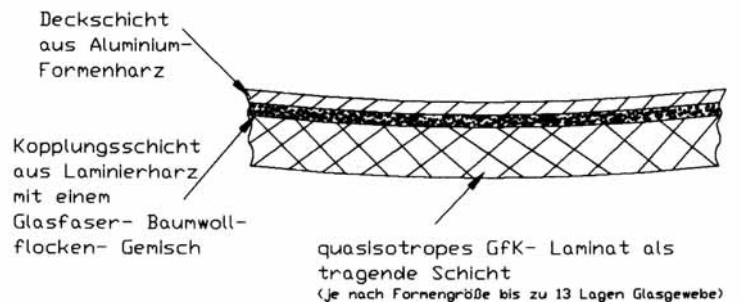


Bild 38: Die Kopplungsschicht wurde auf das angelierte Deckschichtharz aufgetragen. Ecken und Kanten werden zusätzlich mit dieser "breiigen" Masse aufgefüllt.



Bild 39: Das GfK- Laminat ist symmetrisch aufgebaut und schließt mit einem feinen Gewebe ab. Die überstehenden Kanten werden erst nach dem Aushärten besäumt.

Zur Fixierung der Formenhälften zueinander wurden die 3-teiligen R&G-Paßstifte verwendet, zur Verschraubung diente die Fix-A-Form Formverschraubung.

Formverschraubung

Das System besteht aus einem Durchgangsstück, einem Gewindestück und einer Innensechskantschraube, . Das Durchgangsstück wird vor dem Laminieren der ersten Formhälfte mit Sekundenkleber nahe der Formenkante auf dem Trennbrett fixiert. Um ein Vollaufen zu verhindern, wird das Durchgangsloch mit Modelliermasse verschlossen. Nach dem Entfernen des Trennbrettes wird die erste Formenhälfte durch das Durchgangsstück hindurch aufgebohrt, das Gewindestück aufgesetzt, verschraubt und ebenfalls mit Modelliermasse aufgefüllt. Auf diese Weise erhält man einen sehr



Bild 40: Fix-A-Form Formverschraubung /1/

exakten, aber einfach herzustellenden Formenverschluss. Der Vorteil gegenüber anderen Verschlüssen liegt besonders darin, dass bei entsprechender Platzierung der Formverschraubung nahe der Naht die Form im Nahtbereich zusammen gepresst und damit eine gleichmäßige schmale Naht für alle Bauteile gewährleistet wird.

Passtifte

Die Passtifte bestehen aus zwei Messingbuchsen und einem herausnehmbaren Stahlstift. Die Messingbuchsen werden wie die Buchsen der Formverschraubung im Nahtbereich mit Sekundenkleber auf dem Trennbrett fixiert. Da die Passtifte dieses Systems herausnehmbar sind, wird das Beschneiden der Laminare und das Säubern der Form nicht durch hervorstehende Dübel unnötig erschwert. Außerdem besteht hierbei nicht die Gefahr, dass beim Einsetzen im Vakuum der Foliensack durch die Dübel verletzt wird.

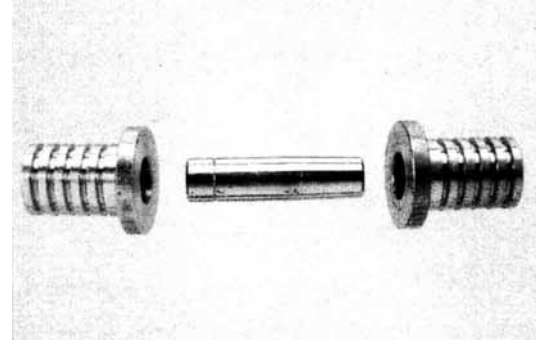


Bild 41: Passtifte garantieren einen exakten Sitz der Formhälften zueinander /1/.

Profilhinterkante

Bei spitz auslaufenden Kanten wie Profilhinterkanten wurde außerdem in die Form ein Aluminium-U-Profil eingesetzt, das ein einfaches Besäumen des Laminates an der Hinterkante mit dem Messer ermöglicht und somit eine definierte Endleiste gewährleistet.

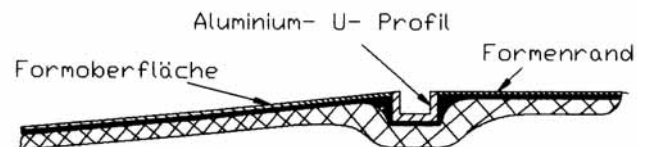


Bild 42: Das eingesetzte Aluminiumprofil an der Formkante ermöglicht ein definiertes und einfaches Besäumen der Bauteile.

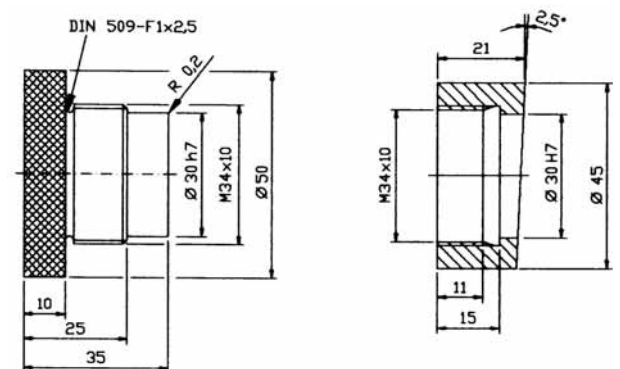
Ausrichtung der Steckungen

Üblicherweise werden Stellen, an denen im Bauteil Durchbrüche erfolgen sollen, in der Form angerissen. Dieser Anriss wird bei der Herstellung auf das Bauteil übertragen und dient als kleine Orientierungshilfe für die mechanische Nachbearbeitung.

Da die Rohrsteckungen der Tragflächen und Höhenleitwerke eine sehr hohe Passgenauigkeit erfordern, ist die Nachbearbeitung auf diesem Wege sehr aufwendig, da Flächen und Leitwerke bei jedem Modell erneut exakt ausgemessen und ausgerichtet werden müssen. Daher wurden in die Form Messingbuchsen eingesetzt, die als Aufnahme für schraubbare Messingbolzen dienen. Diese Bolzen ragen jeweils an entsprechender Stelle in die Formhälfte hinein und formen sich somit bei der Herstellung der Halbschalen exakt mit ab.

Vor dem Zusammenfügen der Formhälften werden die Bolzen herausgeschraubt und durchgehende Steckungsrohre werden beim Zusammenfügen durch beide Formhälften durchgesteckt.

Bild 43: Das System aus Messingbuchse mit schraubbaren Passbolzen wird in die Rumpfform eingeklebt. Dadurch kann der Rumpf mit bereits ausgerichteter Steckung hergestellt werden.



Paßbolzen

Paßbuchse

Gleichzeitig werden dabei im Rumpf passend abgelängte Hülsen mit eingesetzt. Diese werden beim Verkleben der Rumpfhälften mit verklebt. Somit weist der Rumpf beim Entformen schon fertig ausgerichtete Steckungen mit den zusätzlichen Versteifungshülsen auf.

Bild 44: Die Messingbuchsen mit den Passbolzen, die Formverschraubung und die Messingbuchsen für die Passstifte werden nach dem Auftrag des Trennmittels auf den Positivkern bzw. das Trennbrett aufgesetzt. Erst dann kann durch Auftragen des Deckschichtharzes mit dem schichtweisen Aufbau der Negativform begonnen werden.



Bild 45: Insgesamt mussten zur Herstellung des Modells 9 Negativformen erstellt werden, die bis auf die Form für den Kabinenhaubenrahmen alle aus jeweils zwei Hälften bestehen.

6.3. Herstellung der Wabensandwichbauteile in Negativformen

6.3.1. Erstellen eines Laminierplanes

Um die Möglichkeiten der Faserverbundwerkstoffe voll ausschöpfen zu können, ist es sehr wichtig, dass die Fasern im Bauteil entsprechend der Belastungsrichtung angeordnet werden. Wie bereits erwähnt, sind die Belastungen im vorliegenden Fall gering. Das entscheidende Dimensionierungskriterium sind hier nicht die maximalen Betriebslasten, sondern außerordentliche Lasten wie Schlag- und Stoßkräfte beim Transport. Hinzu kommt, dass eine Mindestlaminatstärke erzielt werden muss, damit das Decklaminat nicht innerhalb der Sechseckzellstruktur des Wabekerns ausbeult. Verschiedene Materialkombinationen, die bei Wabensandwichbauteilen im Modellbau sinnvoll erscheinen wurden bereits in *Kapitel 5.3* erläutert.

Für das Modell der EA 300 wurde für alle Wabensandwichbauteile die äußere Decklage aus zwei Lagen 49 g/m² Glasgewebe hergestellt. Der Grund für diese Auswahl war vor allem die geringe Rissempfindlichkeit des zweilagigen quasiisotropen Laminates gegenüber den einlagigen Laminaten. Ein quasiisotropes Laminat erhält man z.B. indem man die Faserorientierung übereinander liegender Gewebelagen jeweils um 45° dreht. So spielt auch hier bei den vorliegenden geringen Belastungen die Faserablage im Bauteil eine bedeutende Rolle.

Zusätzlich werden an Krafteinleitungsstellen wie im Bereich der Rumpfsteckungen und der Fahrwerksbefestigungen noch einige Gewebelagen zur Verstärkung eingebracht. Die Tragflügelschale erhält zusätzliche Verstärkungen im Bereich des Steckungsrohres und entlang der Querruderanten. Die kleinen Bauteile erhalten lediglich dort zusätzliche Gewebeverstärkungen, wo aus fertigungstechnischen oder funktionstechnischen Gründen das Sandwich ausgespart wird. Der Zuschnitt der Gewebe erfolgt nach Pappschablonen.

Um einen zügigen Laminiervorgang zu gewährleisten und Ablagefehler zu vermeiden, werden die Zuschnitte vorher so abgelegt, dass sie in der später benötigten Reihenfolge aufgenommen werden können. Besonders bei größeren Zuschnitten mit diagonalem Faserverlauf ist darauf zu achten, dass diese sich nicht verziehen. Damit sie sich beim Einlegen nicht aushängen, können sie vorher aufgerollt werden.

Um sich einen Überblick über die benötigten Gewebezuschnitte und deren Ablage im Bauteil zu verschaffen, ist es sinnvoll, sich vorher einen Laminierplan aufzustellen, *Bild 46*.

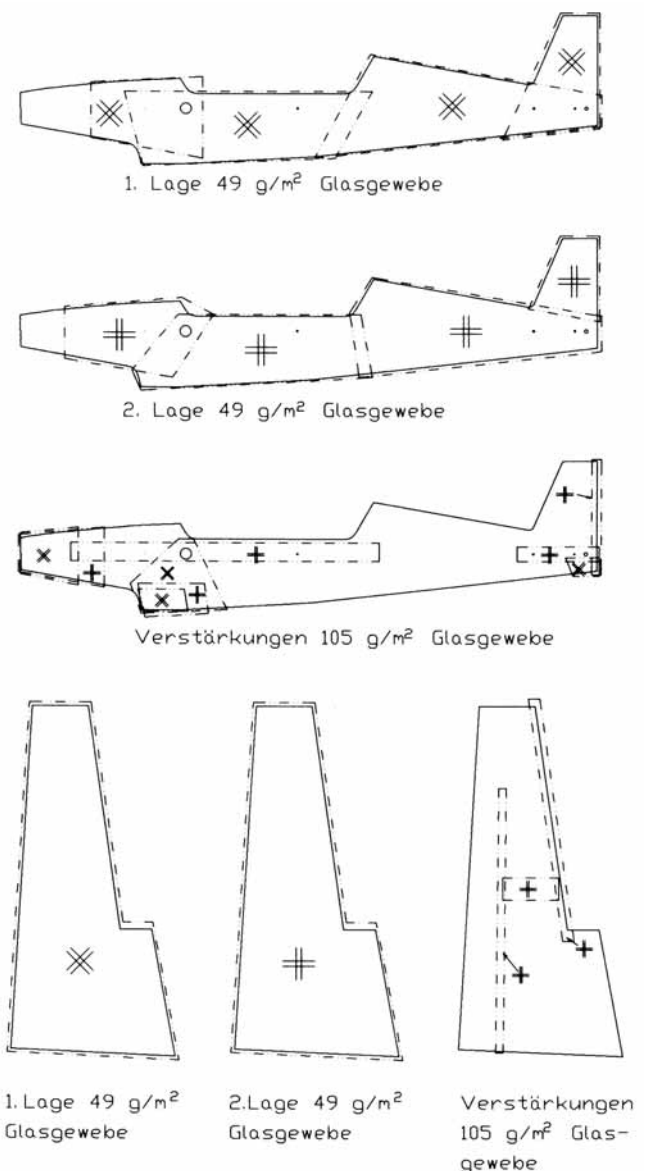


Bild 46: Laminierplan für den Rumpf und den Tragflügel.

6.3.2. Laminieren der äußeren Decklage

In die gewachste Form wird zunächst 2 K-Acryllack gespritzt. Dieser ist wesentlich leichter als das sonst im Kunststoffbau verwendete Gelcoat. Allerdings besitzt Acryllack nicht die erforderliche UV-Beständigkeit wie das Gelcoat und wäre daher für sicherheitsrelevante Bauteile wie z.B. im Flugzeugbau nicht geeignet. Im vorliegenden Fall spielt dies jedoch keine Rolle.

Nachdem der Lack gut angeliert ist, sollte innerhalb der nächsten 12 Stunden die äußere Decklage laminiert werden, um eine gute Verbindung zwischen Lack und Decklaminaten zu erhalten.

Bevor mit dem eigentlichen Laminiervorgang begonnen wird, werden die Ecken und Kanten mit angedicktem Harz angefüllt. Dazu wird Harz mit Micro-Ballons und etwas Thixotropiermittel angedickt, in eine Tüte gespachtelt und nachdem eine Ecke der Tüte aufgeschnitten worden ist, in die Kante gespritzt, *Bild 48*.

Bei den dünnen Glasgeweben ist allerdings nur sehr wenig angedicktes Harz notwendig. Das Gewebe lässt sich problemlos in einen Kantenradius von 3 mm laminieren, *Bild 47*.



Bild 48: Ecken und Kanten werden vor dem Laminieren mit angedicktem Harz angefüllt.

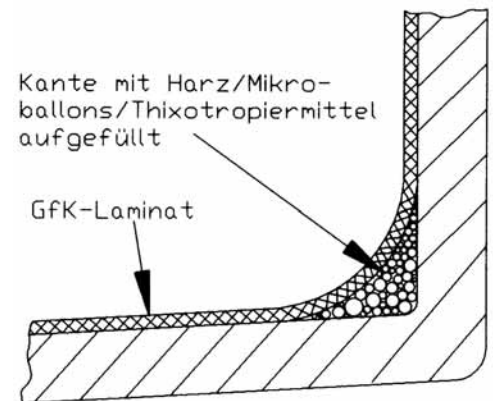


Bild 47: Gestaltung der Bauteilkanten

Um eine gleichmäßige Laminatqualität mit hohem Faservolumengehalt zu erzielen, werden zum Laminieren nur sehr dünnflüssige Laminierharze verwendet. Die besten Ergebnisse wurden mit dem Laminierharz LF mit dem Härter LF 3 erzielt.

Da dieses System ohnehin sehr dünnflüssig ist und außerdem über eine sehr lange Topfzeit verfügt, konnte die Viskosität durch vorheriges Erwärmen des Harzes im Wasserbad auf ca. 30° noch weiter herabgesetzt werden. Gegenüber dem Einsatz von Reaktivverdünnern werden dadurch die mechanischen Eigenschaften der ausgehärteten Harze nicht negativ beeinträchtigt. Da die Viskosität schon weit vor dem eigentlichen Angelieren der Harze deutlich ansteigt, wird nur soviel Harz angerührt, wie in den nächsten 15 Minuten verarbeitet werden kann. Die Form wird nun zuerst sehr gleichmäßig dünn mit Harz ausgerollt. Dies geschieht am sinnvollsten mit einer Moltopenrolle. Die gleichmäßige Benetzung der Oberfläche ist hier schon entscheidend für die spätere Laminatqualität. Deshalb geschieht der Harzauftrag im Kreuzgang.

Bild 49: Damit das Gewebe "von unten" durchtränkt werden kann, wird zuerst Harz in die Form gerollt.

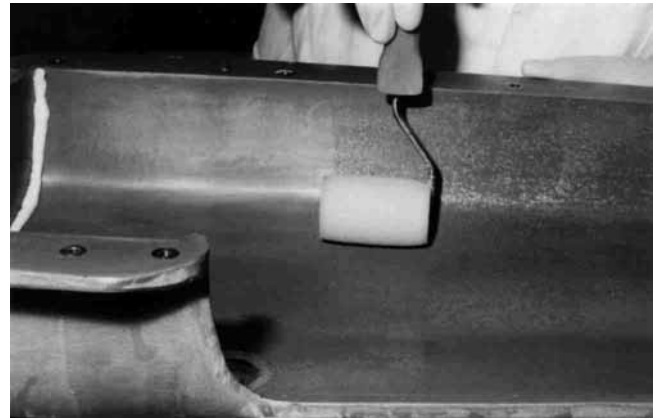


Bild 50: Anschließend wird die erste Gewebelage eingelegt. Größere Stücke werden dabei aufgerollt, damit sie sich während des Einlegens nicht verziehen.

Die erste Gewebelage hat sinnvoller Weise eine Faserorientierung von 45° zu den Kanten, da sie sich so einfacher laminieren lässt. Erst wenn die erste Gewebelage vollständig durchtränkt ist, wird die zweite Lage des 49 g/m^2 Gewebes mit einem um 45° versetzten Faserwinkel eingelegt.

Um sie zu durchtränken, reicht das schon vorhandene Harz meistens aus. Wo notwendig, kann in sehr kleinen Mengen mit der Moltoprenrolle neues Harz zugegeben werden.

An Krafteinleitungsstellen und dort, wo die Sandwichbauweise durch Voll laminate ersetzt wird, werden zusätzliche Lagen 110 g/m^2 -Glasgewebe eingebracht, *Bild 52*.

Bild 52: Einlaminieren zusätzlicher lokaler Verstärkungen.



Bild 51: Flächen werden mit der Moltoprenrolle laminiert ...

Bild 53: ... nur in den Ecken und Kanten kann gegebenenfalls mit einem Pinsel nachgetupft werden.



Bevor der Wabenkern eingeklebt werden kann, muss das äußere Decklaminat mindestens 16 Stunden bei 22° C anhärtet. Andernfalls würde später die Wabenkernstruktur auf der Außenseite durchschlagen. Die Kanten werden nach ca. 10 Stunden mit einem scharfen Messer besäumt. Die Bolzen für die Rohrsteckungen waren bislang nur bündig zur Formoberfläche eingeschraubt, *Bild 54*.

Bild 54: An den Rohrsteckungen wird das äußere Decklaminat ausgeschnitten, bevor der Bolzen soweit wieder eingeschraubt werden kann, dass er um Wabenstärke in die Form hineinragt.



6.3.3. Verkleben des Wabenkerns

Der Wabenkern wird vor dem Verkleben mit einem scharfen Messer zugeschnitten. Dabei muß an den Kanten, an denen die Formhälften später zusammengesetzt werden, ein Überstand von 20-30 mm zugegeben werden.

An den Kanten der Profileisten und am Übergang von der Dämpfungsflosse zum Hohlkehlenruder wird der Wabenkern dagegen um ca. 15 mm ausgespart, *Bild 55*.

Zum Verkleben des Wabenkerns ist nun ein erneuter Harzauftrag notwendig. Wenn weitergearbeitet wird, solange das äußere Decklaminat noch klebrig ist (je nach Temperatur bis zu 20 Stunden) braucht dieses nicht angeschliffen zu werden. Andernfalls muss das äußere Decklaminat mit feinem Schleifpapier 240 er Körnung leicht angeraut werden.

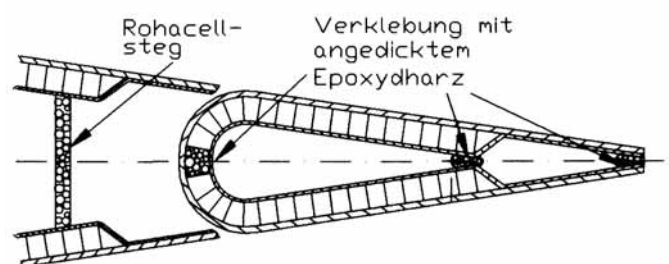


Bild 55: Gestaltung des Sandwichs an der Endleiste und an der Hinterkante der Dämpfungsflosse bei einem Hohlkehlenruder.

Nach anschließendem Entstauben wird das äußere Decklaminat mit sehr dünnflüssigem Laminierharz eingerollt. Maßgeblich dabei ist nicht die Menge des eingerollten Harzes, sondern die Gleichmäßigkeit mit der dieses geschieht. Deshalb ist hierbei sehr sorgfältig und systematisch vorzugehen. Stellen, an denen kein Harz hingelangt, führen später zu Fehlstellen im Bauteil. Hier kann dann nur noch durch aufwendige Nacharbeit und mit deutlichem Gewichtszuwachs (Ausspritzen der Wabenhohlräume mit einem Harz-Micro-Ballons-Gemisch) das Bauteil gerettet werden.

Da dieser Arbeitsgang durch sehr dünnflüssiges Harz wesentlich erleichtert wird, kann hier auch das eingangs beschriebene erwärmte Harzsystem LF noch zusätzlich mit Reaktivverdünner verdünnt werden. Aufgrund seiner papierartigen Struktur besitzt der Polyamid-Wabekern eine gewisse Saugwirkung. Dies macht sich besonders bei dünnflüssigen Harzen bemerkbar, so dass hier die Qualität der Verklebung nochmals gesteigert werden kann. Man kann diesen Effekt besonders gut prüfen, indem man bei der Verklebung eines Wabekerns den Folienschlauch öffnet, bevor das Harz vollständig ausgehärtet ist. Er fühlt sich auch an der Oberseite klebrig an, obwohl das Klebharz nur an der Wabekernunterseite in die Form gerollt wurde. Das dünnflüssige Harz ist somit durch den ganzen Wabekern durchgezogen.

Will man bei der Verklebung ganz sicher gehen, kann man direkt vor dem Verkleben des Wabekerns auch noch eine Lage 25 g/m² Glasgewebe einlegen. Hier sind dann die Stellen, die noch nicht ausreichend mit Harz benetzt sind sehr gut an dem weißlichen Schimmer zu erkennen.

Anschließend wird der Wabekern eingelegt, und zunächst mit Gewichten beschwert. Damit der Wabekern beim Einsetzen der Form in den Folienschlauch nicht wieder aus der Form herauspringt, hat es sich als sehr hilfreich erwiesen, ihn an einigen Stellen mit 5 Minuten-Epoxydharz anzuheften.

Die Form wird dann in den Folienschlauch geschoben, der an beiden Enden mit einer Silikon-dichtnaht verschlossen wird. Beim Absaugen der Luft ist darauf zu achten, dass der Folienschlauch besonders an den Vertiefungen in der Form großzügig in Falten gelegt wird und somit auch wirklich überall auf dem Wabekern anliegt, *Bild 57*. Für eine gute Verklebung sollte ein Unterdruck von mindestens 0,5 bar erreicht werden, Dieser Unterdruck muss je nach Temperatur mindestens 16 Stunden aufrechterhalten werden.



Bild 57: *Besonders bei tiefen Formen wie bei der Rumpfform muss die Folie großzügig in Falten gelegt werden, damit sie überall anliegt.*



Bild 56: *Flache Formen wie die Tragflächenform lassen sich dagegen wesentlich unkomplizierter im Vakuum einsetzen. Eine Faltenbildung des Folienschlauches ist hier nur in geringem Maße notwendig.*

6.3.4. Laminieren der inneren Decklage

Bevor das innere Decklaminat eingelegt wird, wird der Wabenkern an späteren Durchbruchstellen mit angedicktem Harz aufgefüllt, *Bild 59*. Die Passbolzen für die Rohrsteckungen werden ebenfalls vor dem Einlegen des inneren Decklaminates mit angedicktem Harz angefüllt, *Bild 58*.

Bild 59: *Schablonen markieren die Positionen, an denen der Wabenkern mit angedicktem Harz aufgefüllt wird*



Bild 58: *Anfüllen des Wabenkerns mit angedicktem Harz.*

Auf den Wabenkern muss nun das innere Decklaminat aufgebracht werden. Damit hier nicht unnötig viel Harz gebraucht wird und der Wabenkern vollläuft, wird das innere Decklaminat, das aus lediglich einer Lage 49 g/m^2 -Glasgewebe besteht, auf einer Polyethylenfolie vorgetränkt. Dazu werden die Umrisse des inneren Decklaminates auf der Arbeitsunterlage aufgezeichnet. Auf der darüber liegenden Folie kann nun das Glasgewebe wiederum mit sehr dünnflüssigem Laminierharz getränkt werden.

Mit einem scharfen Messer werden dann Gewebe und Folie entsprechend der aufgezeichneten Vorlage zugeschnitten. Das Glasgewebe wird zusammen mit der Folie auf den Wabenkern gelegt. An sphärischen Wölbungen und Ecken muss die Folie vorsichtig vom vorgetränkten Glasgewebe gelöst und eingeschnitten werden. Das Glasgewebe sollte überall glatt auf dem Wabenkern aufliegen, ohne Falten zu bilden. Wenn es dazu ebenfalls eingeschnitten werden muss, ist darauf zu achten, dass keine Folienstücke von überlappenden Glasgewebestücken eingeschlossen werden. Anschließend wird das innere Decklaminat ebenfalls im



Bild 60: *Das innere Decklaminat wird auf einer Folie vorgetränkt ...*

Vakuumsack mit dem Wabenkern verpresst.

Bild 61: ...und zusammen mit der Folie auf den Wabenkern gelegt. Der Wabenkern-überstand am Rand darf erst später abgeschnitten werden, da andernfalls die Kanten beim Verpressen im Vakuumsack zerquetscht würden.



6.3.5. Einsetzen der Einbauten

Bevor die Halbschalen zusammengeklebt werden können, werden in den Tragflügel und das Höhenleitwerk jeweils die Wurzelrippe und die Hülsen für die Steckungen eingeklebt. In die Tragfläche wird außerdem das Servobrett für das Querruder eingesetzt. Im Höhenruder muss die Kunststoffhülse für den automatischen Höhenruderanschluss eingesetzt werden.

Um einen exakten Sitz dieser Einbauten gewährleisten zu können, sind Vorrichtungen notwendig, die wiederum an den Passdübeln auf der Formenkante aufgesetzt werden. Das Einkleben der Einbauten geschieht mit angedicktem Epoxydharz.

Bild 63: Die GfK-Hülse für die Flächensteckung wird mit einer entsprechenden Vorrichtung an der Form ausgerichtet.

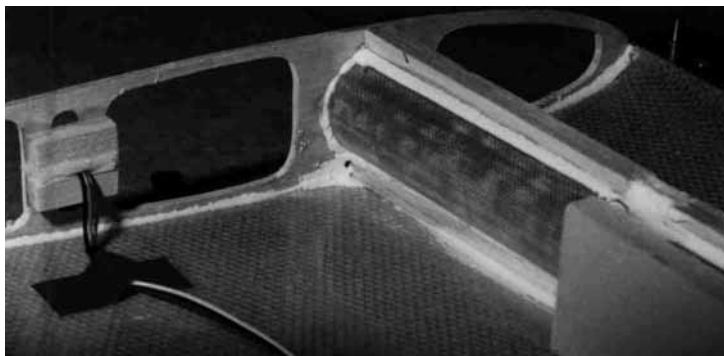


Bild 62: An der Tragflügelwurzel ist die Hülse mit der Wurzelrippe verklebt, in Längsrichtung bilden Balsakeile die Verbindung zur Tragflügelschale.

Bild 66: Zur besseren Krafteinleitung ragt die GFK-Hülse 70 mm weiter in die Tragfläche als das Aluminium-Steckungsrohr. Dieser Teil der Hülse wird mit einem Balsasteg versteift.

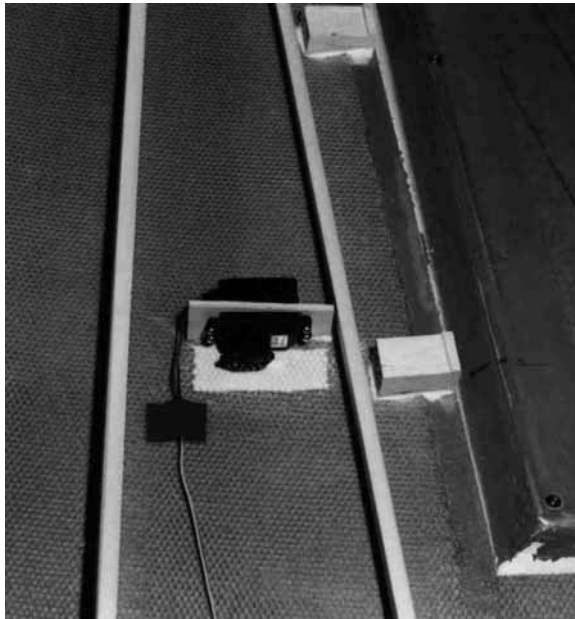
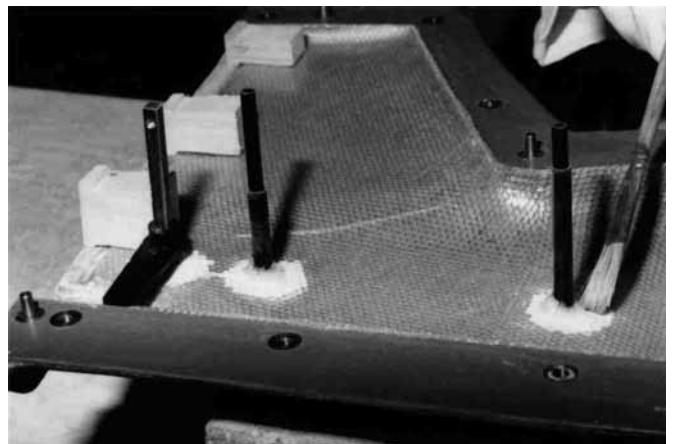


Bild 65: Das Servo wird bereits vor dem Zusammenbau der Tragflächen eingesetzt. Es kann allerdings notfalls auch später noch zu Reparaturzwecken wieder ausgebaut werden. Die Balsafüllklötze bilden die Aufnahme der Stiftscharniere für die Ruderverbindungen.

Bild 64: Beim Rumpf werden im Bereich der Höhenleitwerkssteckung ebenfalls Hülsen eingesetzt. Der Höhenruderantrieb, bestehend aus Aluminiumvierkant und Winkelhebel, muss bereits vor dem Zusammensetzen der Rumpfhälften eingefädelt werden



6.3.6. Verkleben der Halbschalen

Halbschalen in Wabensandwichbauweise lassen sich sehr einfach mit angedicktem Harz zusammenkleben. Hierbei kann die volle Sandwichstärke als Klebefläche ausgenutzt werden.

Da sich zusätzlich das mit Überschuss aufgetragene Harz in die Wabenhohlräume presst, wird dabei die Klebefläche zusätzlich vergrößert. Um dabei keinen unnötigen Gewichtszuwachs hinnehmen zu müssen, wird das Harz mit Mikro-Ballons unter geringer Zugabe von Thixotropiermittel angedickt. Überschüssiges Harz sollte allerdings dennoch auf der Bauteilinnenseite - soweit zugänglich - mit dem Pinsel abgestriffen werden.

Bild 68: Das angedickte Harz zum Verkleben der Schalenkanten wird mit der "Spritztüte" aufgetragen.

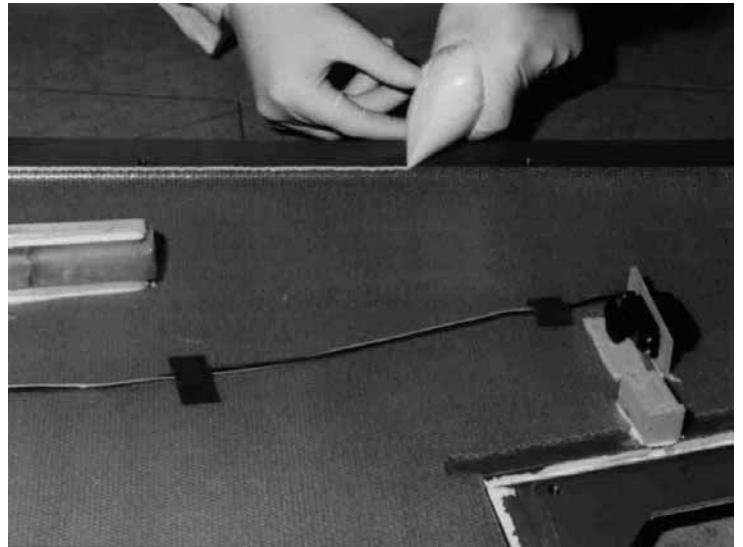


Bild 69: Die Endleiste erhält zur Versteifung 2 Klebenähte.



Bild 67: Die Längssteifen im Tragflügel und in der Höhenleitwerksdämpfungsflosse werden aus Gewichtsgründen mit Bauschaum eingesetzt.



Bild 71: Die Passbolzen garantieren beim Zusammensetzen der Halbschalen den exakten Sitz der Formenhälften zueinander.



Bild 72: Im Motorraum ersetzt ein Vollaminat das Wabensandwich. Beim Zusammenbau der Halbschalen muss die Naht auf der Innenseite mit einem Nahtband verstärkt werden.

Bild 70: Die GFK-Hülse wird auf das Aluminiumrohr aufgefädelt und mit den Rumpfseitenwänden verklebt. Dadurch wird der Rumpf im Bereich der Tragflügelsteckung deutlich versteift.



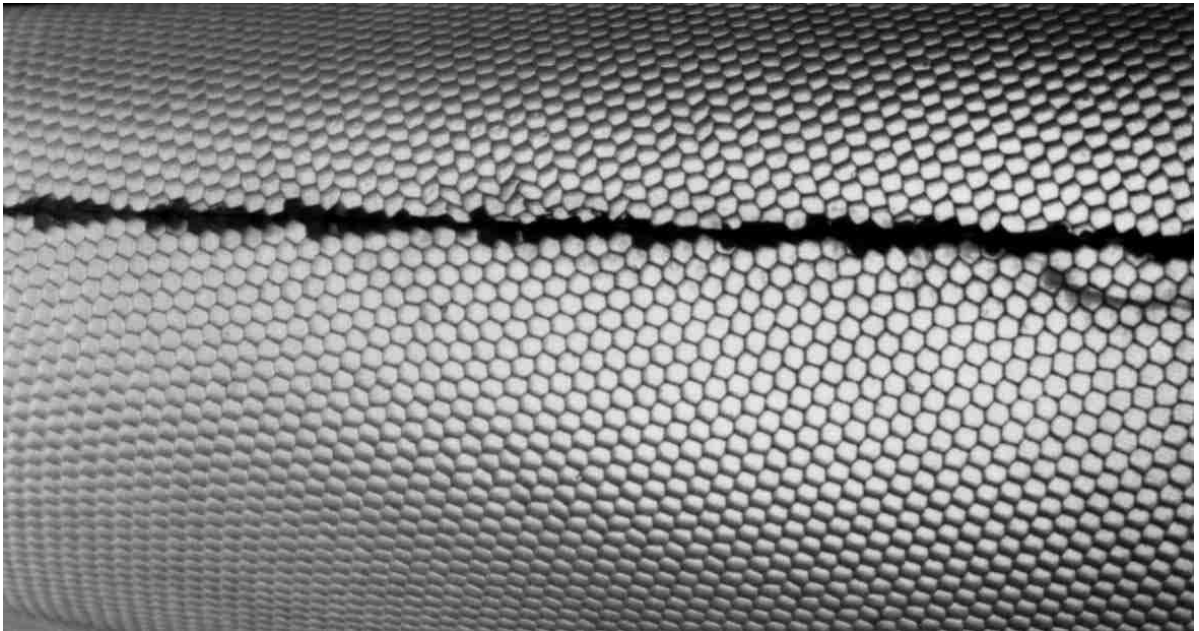


Bild 73: Die Verklebung einer Sandwichkante in der Gegenlichtaufnahme. Das angedickte Harz ist beim Zusammensetzen in die Wabenhohlräume gepresst worden.

6.4. Fertigstellung des Modells

Nachdem die Verklebungen ausgehärtet sind, werden die Bauteile entformt. Das Entformen ist unproblematisch, wenn die Formen überall genügend Formschrägen aufweisen und entsprechend mit Trennmittel behandelt wurden. Im vorliegenden Fall wurden für alle Formen das R&G Flüssigtrennwachs verwendet. Hiermit wurde in allen Fällen ein einwandfreies Trennungsergebnis erzielt. Die Nähte der Bauteile müssen anschließend mit feinem Schleifpapier verputzt werden, *Bild 74*.

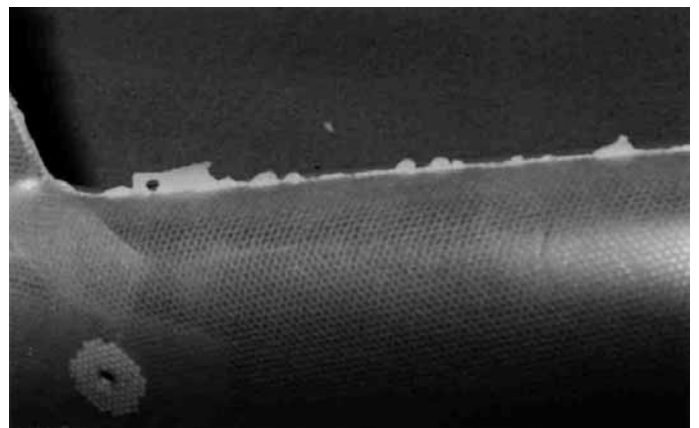


Bild 74: Der feine Grat an der Bauteilnaht lässt sich sehr einfach mit feinem Schleifpapier nacharbeiten.

Offene Wabensandwichkanten an der Stirnseite der Ruder und an den Wurzelrippen von Tragfläche und Höhenleitwerk werden mit angedicktem Harz aufgefüllt. Höhenleitwerk und Tragfläche werden dann an den Rumpf gesteckt, der zuvor noch mal mit Trennmittel behandelt wurde. Auf diese Weise erhält man eine gute Passgenauigkeit zwischen Rumpf und Tragfläche bzw. Höhenleitwerk.

Bei der weiteren Fertigstellung des Modells insbesondere beim Motoreinbau und beim Einbau der Fernsteuerungsanlage wurde ebenfalls sehr streng auf das Gewicht geachtet. Hier galt: Nichts wurde eingebaut, bevor es nicht einer kritischen Überprüfung mit der Briefwaage unterzogen wurde. Vor der abschließenden Lackierung wurden das Modell mit Silikon- und Wachsentsferner abgewaschen. Die

Lackierung erfolgte wie schon bei der Lackierung der Grundfarbe in der Form mit 2-Komponenten-Acryllack.

Bild 76: *Der großvolumige Rumpf bietet reichlich Platz für den Einbau der Fernsteuerung. Da der Motor über ein Kraftstofffördersystem verfügt, konnte der Tank im Schwerpunkt angeordnet werden.*

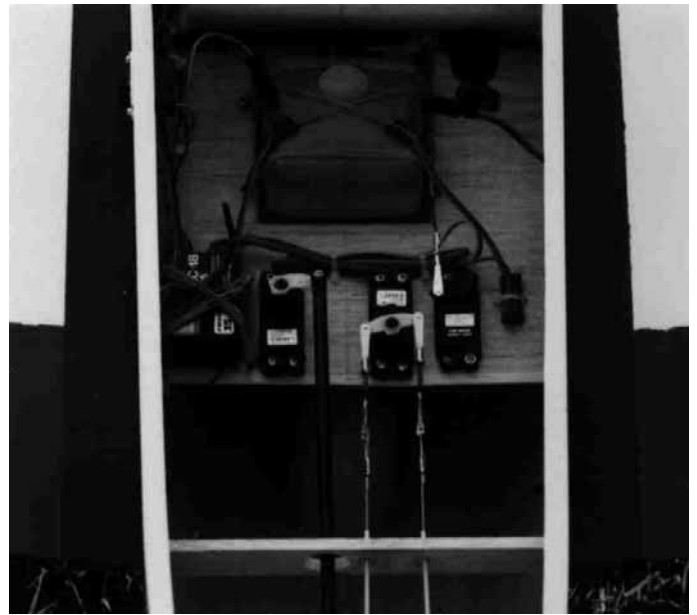


Bild 75: *Das flugfertige Modell wiegt ohne Kraftstoff 4900 g. Eine strenge Gewichtsdiät in allen Bauphasen war nötig, um wie gefordert die 5 kg Grenze zu unterschreiten. Damit wiegt das Modell gut 2 kg weniger als vergleichbare F3A-X- Modelle.*

Flugerprobung

Aufgrund der äußerst geringen Flächenbelastung verfügt das Modell über sehr gutmütige Langsamflugeigenschaften. Bei der Flugerprobung bestätigt sich, was sich in vorherigen Versuchen schon angedeutet hat, dass die Wahl der Profile NACA 0012 und NACA 0009 als Wurzel- bzw. Randbogenprofil bei geringen Flächenbelastungen unter 60 g/dm^2 eine gute Kombination darstellen.



Bild 77: Aufgrund der geringen Flächenbelastung und der darauf abgestimmten Profilwahl verfügt das Modell über äußerst gutmütige Langsamflugeigenschaften.

Dabei ist auch das Abrissverhalten so, wie es von Wettbewerbsmodellen verlangt wird: Während nur mit Höhenruder gesteuert praktisch kein Strömungsabriss zu erzeugen ist, erfolgt unter Zugabe von Quer- und Seitenruder der Abriss schlagartig. Nach den Snap-Figuren rastet das Modell exakt wieder ein.

Das Modell fliegt in einem sehr weiten Geschwindigkeitsbereich. Dabei ist die Grundgeschwindigkeit deutlich geringer als die eines üblichen F3A- oder auch eines F3A-X-Modells. Dennoch steht die EA 300 in der Steigleistung anderen Wettbewerbsmodellen in nichts nach. Der Antrieb verfügt über genügend Kraftreserven für alle senkrechten Steigpassagen, die in den aktuellen Kunstflugprogrammen abverlangt werden.

Bei mehreren Wettbewerbseinsätzen zeigte sich dabei, dass das Modell den gängigen F3A-Modellen in Flugeleistungen und Flugeigenschaften zumindest ebenbürtig ist. Es fällt hier jedoch nicht nur allein durch sein vorbildähnliches Aussehen, sondern besonders durch seine Größe und das ruhigere, vorbildgetreue Flugbild im Vergleich zu anderen F3A-Wettbewerbsmodellen auf.

Dabei bestätigten mehrere Piloten bereits nach einem Probeflug, dass das Modell nur einer außergewöhnlich kurzen modellspezifischen Gewöhnungsphase bedarf. Während ein Pilot häufig mehrere Flüge mit einem Modell benötigt, um die ersten Figuren exakt fliegen zu können, war dies bei der EA 300 wesentlich schneller möglich. Dieses ist wohl in erster Linie auf die Größe des Modells

verbunden mit einer großen aerodynamischen Trägheit mit der geringen Massenträgheit zurückzuführen. Hieraus ergibt sich eine hohe Ruderfolgsamkeit.

Weiterhin fällt auf, dass das Modell trotz des enormen Kraftüberschusses sehr leise ist. Hier spielen neben den antriebsspezifischen Maßnahmen zur Antriebsabstimmung und Lärmdämpfung die Dämpfungseigenschaften des Werkstoffes eine wesentliche Rolle. Neben den günstigen gewichtsspezifischen Eigenschaften verfügen Bauteile in Wabensandwichbauweise über eine sehr hohe Eigendämpfung. Dabei zeigte das Wabensandwich nach bislang ca. 200 Flügen keinerlei Ermüdungserscheinungen. Delaminationsprobleme traten bislang nicht auf. Aufgrund der sehr hohen Druck- und Beulsteifigkeit der Wabensandwichbauteile kann diese Bauweise daher als "besonders gut alltagstauglich" bezeichnet werden.



Bild 78: *Als Kunstflugmodell weist die EA 300 ein sehr ausgewogenes Flugverhalten in allen Fluglagen auf.*

7. Schlussfolgerungen

Mit 4,9 kg Abfluggewicht konnte das Modell der EA 300 in Wabensandwichbauweise deutlich leichter gebaut werden, als vergleichbare F3A-X-Modelle. Das Ziel, ein F3A-X-Modell auch im F3A-Wettbewerb einsetzen zu können, war damit erreicht. Dabei wird ein Großteil der Gewichtseinsparung durch die konsequente Anwendung der Wabensandwichbauweise erzielt. Besonders bei großflächigen Bauteilen wie dem Rumpf und der Tragfläche konnte bei wesentlich erhöhter Druck- und Beulsteifigkeit gegenüber anderen Bauweisen an den Rohbauteilen ca. 40 % Gewicht eingespart werden.

Die Grenzen der Gewichtseinsparung wurden jedoch bei den kleineren Bauteilen deutlich. Das Höhenleitwerk und auch die Seitenruderklappe sind in Wabensandwichbauweise sogar geringfügig schwerer, als dieses in anderen Bauweisen zu erreichen gewesen wäre. Das liegt zum einen an dem ungünstigen Verhältnis von Oberfläche zu Nahtumfang, wodurch das Gewicht bei der Verklebung der Halbschalen bei kleineren Bauteilen stärker zu Buche schlägt. Zum anderen ist durch die verfügbaren Materialien eine Mindestdimensionierung vorgegeben, wenn man bei Anwendung dieser Bauweise fehlerfreie und formgenaue Oberflächen erhalten will. Bei dem geringen Belastungsniveau führt dies bei kleinen Bauteilen zu maßloser Überdimensionierung.

Aus dieser Erkenntnis läßt sich direkt der prädestinierte Einsatzbereich einer solchen Bauweise ableiten:

- Die erzielte Gewichtseinsparung wird umso größer ausfallen, je großflächiger die Bauteile sind und umso dringender Bauteile eine Versteifung gegen Beulverformung erfordern.
- Im Modellflugbereich sind dies in erster Linie große Kunstflugmodellrumpfe und Tragflächen.
- Aber auch für große Impellerflugmodelle und Elektroflugmodelle dürfte diese Bauweise besonders gut geeignet sein.
- Weniger geeignet ist die Wabensandwichbauweise für kleine und schlanke Bauteile. Beispielsweise ist bei schlanken Seglerrümpfen und Tragflächen mit keiner deutlichen Gewichtseinsparung zu rechnen.
- Interessant dürfte diese Bauweise allerdings auch hier dann werden, wenn wie beim F3B die Belastungen extrem hoch sind. Da beim Windenstart von F3B-Modellen die Belastungen um ein Vielfaches höher sind als die Maximalbelastungen bei Kunstflugmodellen kann auch hier das Werkstoffpotential sinnvoll ausgeschöpft werden.

Die Herstellung von Wabensandwichbauteilen ist allerdings auch wesentlich aufwändiger als die Herstellung konventioneller GfK-Bauteile. Im Rahmen dieser Arbeit konnte jedoch auch hier wichtige Erfahrung gesammelt werden:

Bei höchsten Anforderungen an die Gewichtseinsparung sind mit sehr dünnflüssigen Harzsystemen wie beschrieben die besten Ergebnisse zu erzielen, ohne daß dabei die Qualität der Verklebung beeinträchtigt wird. Weiterhin zeigte sich, daß auch die sehr dünnen inneren Decklamine wie sie im Flugmodellbau relevant sind, auf einfachere Weise mit dem Wabenkern verklebt werden können, wenn sie vorher vorgetränkt werden. Gegenüber dem bislang angewendeten Verfahren, bei dem der Wabenkern mit dünnflüssigem Harz benetzt und anschließend das trockene Glasgewebe angedrückt wurde, werden hierbei mit deutlich geringerem Aufwand bessere Verklebungen bei gleichem Gewicht erzielt.

Außerdem können auf diese Weise bei flacheren Formen wie Tragfläche und Leitwerk Wabenkern und inneres Decklaminat in einem Arbeitsgang verklebt werden. Durch die Einsparung eines Vakuumarbeitsganges kann der Herstellungsaufwand damit deutlich reduziert werden. Allerdings führte dies bei tiefen Formen wie der Rumpfform bislang noch nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis.

Für die Herstellung im Serienverfahren ist diese Bauweise nur dann geeignet, wenn Höchstanforderungen gestellt werden und damit auch überdurchschnittliche Preise erzielt werden können. Hier müssen dann weitere Maßnahmen ergriffen werden, um diesen Fertigungsprozeß zu vereinfachen und die Herstellungskosten zu senken: Pro Bauteil sind mehrere Härtingsphasen notwendig. Dies bedingt sehr lange Zykluszeiten. Diese können allerdings durch beheizbare Formen auf einen Bruchteil der sonst üblichen Zeiten gesenkt werden. Weiterhin gilt es, die Vakuumarbeitsgänge zu vereinfachen. Um hier Kosten an Verbrauchsmaterialien wie Folien und Dichtmassen einsparen zu können, müssen wieder-verwendbare Vakuumdichtsystem verwendet werden. Im Zubehör für die Luft- und Raumfahrtindustrie gibt es solche Dichtsysteme aus Silikontüchern.

Der Einstieg in die Serienproduktion in dieser Bauweise sollte dabei sinnvollerweise bei einfach herzustellenden Bauteilen geschehen. Flache, eindimensional gewölbte Schalen wie Tragflügel sind hierzu besonders geeignet. Bei entsprechender Formgestaltung und beschriebener Vakuumtechnik scheint eine wirtschaftliche Herstellung möglich.

8. Literaturverzeichnis

/1/	N.N.	Informationskatalog über neue Werkstoffe sowie fertigungstechnische Verfahren; R&G Flüssigkunststoffe GmbH; Postfach 1145, D-7035 Waldenbuch
/2/	H. Hertel	Leichtbau; Springer 1980; ISBN 0-387-09765-1
/3/	Lnenicka/Janovec	Aerodynamik der Motor-Flugmodelle; Verlag für Technik und Handwerk GmbH ;ISBN 3-88180-013-
/4/	Schlichting/Truckenbrodt	Aerodynamik des Flugzeuges; Erster Band Springer-Verlag; ISBN 0-387-03970-8
/5/	Schlichting/Truckenbrodt	Aerodynamik des Flugzeuges; Zweiter Band; Springer-Verlag Berlin; ISBN 0-387-04700-X
/6/	G. Schulz; M. Schulz	GFK-Technik im Modellbau, Faserverbundwerkstoffe; Anwendung und Verarbeitung; Neckar-Verlag; Villingen-Schwenningen; ISBN 3-7883-1107-X
/7/	Michaeli/Wegener	Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe; Carl-Hanser-Verlag; München, Wien; ISBN 3-446-15786-7
/8/	N.N.	MTB 3; NACA-Profile; Verlag für Technik und Handwerk, 1979; ISBN 3-88180-103-0
/9/	P. Wessels	RC-Luftakrobatik; Der ferngesteuerte Motorkunstflug der Klassen F3A und F3A-X; Neckar-Verlag, Villingen-Schwenningen, 1990; ISBN 3-7883-0627-0
/10/	D. Pfefferkorn	Faserverbundwerkstoffe im Flugmodellbau; NV-Verlag, Villingen-Schwenningen; ISBN 3-7883-0612-2
/11/	U. Steenbuck; C. Baron	MTB 14; Moderner Tragflächenbau in Styropor-Sandwich- und Voll-GFK-Bauweise; Verlag für Technik und Handwerk GmbH; ISBN 3-88180-114-6
/12/	N. N.	FMT; Ausgabe 3/91; Verlag für Technik und Handwerk
/13/	N. N.	Modell; Ausgabe 11/90; Neckar-Verlag
/14/	H. Heißler	Verstärkte Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik; Stuttgart: Kohlhammer, 1986; ISBN 3-17-008836-X
/15/	N. N	GM Modellflugtechnik; Gesamtkatalog 1990
/16/	R.Schröder; H. Funke	Entwicklung eines Roboterarmes aus Hochleistungs- Faserverbundwerkstoffen; Studienarbeit am LKL, FB 10 der Universität-Gesamthochschule Paderborn
/17/	P. Holland	Formenbau und Glasfasertechnik für Flugmodelle; FMT- Fachbuch; Verlag für Technik und Handwerk GmbH; Postfach 1128, 7570 Baden-Baden; ISBN 3-88180-409-9
/18/	E. H. Schindel- Bidinelli W. Gutherz	Konstruktives Kleben; Ein Lehrgang; Weinheim, Basel, VCH 1988 ISBN 3-527-26646-1
/19/	N.N.	Trennmittel; Technische Information; R&G Flüssigkunststoffe, Waldenbuch
/20/	N.N	Arbeitsschutz Epoxydharz; Technische Information R&G Flüssigkunststoffe, Waldenbuch
/21/	N.N	Sandwich-Konstruktionen in Wabenbauweise; Technische Information R&G Flüssigkunststoffe, Waldenbuch