

Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges

Dissertation von Herbert Funke

Immer weiter steigende Anforderungen an technische Produkte erfordern den Einsatz neuer, leistungsfähigerer Werkstoffe. Faserverbundwerkstoffe bieten im Bereich des Leichtbaus neue Möglichkeiten, hochbelastete Strukturen mit geringem Gewicht aufzubauen. Durch die Vielfalt der Kombinationen von Faser-Matrix-Verbunden und die besonderen Möglichkeiten der Bauteilgestaltung kann für den einzelnen Anwendungsfall ein Werkstoff „maßgeschneidert“ werden. Unterschiedliche Fertigungsmethoden erlauben es außerdem, zusätzlichen Werkstoff gezielt dort anzuordnen, wo dieser strukturell erforderlich ist, oder auch wegzulassen, wo er nicht erforderlich ist. Neben den gewichtsspezifischen Vorteilen eröffnen sich dem Anwender von Faserverbundwerkstoffen damit noch zusätzliche konstruktive Möglichkeiten zur Gewichtsersparnis.

In Wabensandwichbauweise können großflächige Strukturen mit geringem Gewicht aufgebaut werden. Die erforderliche Biege- und Beulsteifigkeit großer Platten- und Schalenstrukturen wird über die Gesamtdicke der Sandwichstruktur erreicht, die sich im Wesentlichen aus dem leichten, drucksteifen Wabekern ergibt. Es ist bekannt und durch einzelne Anwendungen belegt, dass extremer Leichtbau in Faserverbund-Wabensandwichbauweise möglich ist. Das spezifische Wissen um diese Bauweise ist bislang jedoch kaum verbreitet. Insbesondere fehlt es an Werkstoffkennwerten sowie an einer Systematik, die den Prozeß zur Entwicklung von Faserverbund-Wabensandwichkonstruktionen in systematischer Weise aufbereitet und dem Konstrukteur Hilfestellung bei der Anwendung dieser Bauweise gibt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst ein Prüfverfahren mit zugehörigem Prüfaufbau entwickelt, das die Ermittlung von Plattensteifigkeiten anhand von Testplatten ermöglicht. Im experimentellen Teil der Arbeit wurden dabei umfangreiche Steifigkeitsanalysen durchgeführt, die wichtige Erkenntnisse für die Auslegung von Sandwichkonstruktionen liefern. Darüber hinaus wurde eine Systematik für die Entwicklung von Faserverbund-Wabensandwichstrukturen erarbeitet. Sie soll den mit Leichtbauaufgaben betrauten Konstrukteur unterstützen, Leichtbaukonstruktionen werkstoff- und fertigungsgerecht in dieser Bauweise umzusetzen.

Im abschließenden Teil der Arbeit erfolgt eine Erläuterung der Entwicklungssystematik anhand eines Ultraleichtflugzeuges in FVK-Wabensandwichbauweise. Besonderheiten, die sich durch die spezielle Bauweise ergaben, werden herausgestellt und eingehend erläutert. Auf diese Weise werden Erfahrungen bei der Entwicklung von Faserverbund-Wabensandwichkonstruktionen auf wissenschaftlich gesicherter Basis in systematisch aufbereiteter Form weitervermittelt.

ISBN 3-00-008670-6

© 2001 Herbert Funke, Rheda-Wiedenbrück

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Problemstellung und Zielsetzung aus dem derzeitigen Kenntnisstand	3
2.1 Leichtbau.....	3
2.1.1 Konzeptioneller Leichtbau.....	3
2.1.2 Strukturoptimierter Leichtbau.....	4
2.1.3 Bedingungsleichtbau.....	5
2.1.4 Werkstoffleichtbau.....	6
2.2 Faserverbundwerkstoffe.....	7
2.2.1 Matrixwerkstoffe.....	8
2.2.2 Verstärkungsfasern.....	11
2.2.3 Textile Flächengebilde.....	15
2.2.3.1 Vliese.....	15
2.2.3.2 Gewebe, Gelege und Geflechte.....	16
2.2.3.3 Gestricke und Gewirke.....	18
2.2.4 Wabenkerne.....	19
2.3 Herstellung von Faserverbundbauteilen.....	22
2.3.1 Handarbeitsverfahren.....	22
2.3.2 Prepregverarbeitung.....	23
2.3.3 Faserspritzverfahren.....	24
2.3.4 Wickelverfahren.....	24
2.3.5 Schleuderverfahren.....	25
2.3.6 Pressverfahren.....	25
2.3.7 Pultrusion (Strangziehverfahren).....	26
2.3.8 Härteverfahren.....	27
2.3.9 Auswahl eines geeigneten Herstellverfahrens.....	30
2.4 Gestaltung von Faserverbundkonstruktionen.....	32
2.4.1 Allgemeine Gestaltungsregeln.....	32
2.4.2 Versteifung durch Sandwichbauweisen.....	34
2.4.3 Gestaltung von Krafeinleitungen.....	36
2.4.4 Entformbarkeit.....	39

	Seite
2.5 Berechnung von Faserverbundkonstruktionen.....	40
2.5.1 Die Mikromechanik der Einzelschicht	40
2.5.2 Die Makromechanik mehrschichtiger Lamine	41
2.5.3 Zielsetzung einer vereinfachten Vordimensionierung.....	43
2.5.4 Dimensionierung anhand von Werkstoffkennwerten.....	43
2.5.5 Ermittlung der Laminatsteifigkeiten mit Hilfe der Composite Disc	48
2.6 Sandwichkonstruktionen.....	49
2.6.1 Steifigkeit von Sandwichelementen	49
2.6.2 Nachweis einer genügenden Beulsteifigkeit	51
2.7 Zielsetzung.....	53
3 Ermittlung der Steifigkeit von Wabensandwichplatten	55
3.1 Mechanische Voraussetzungen	55
3.2 Versuchsaufbau	57
3.3 Prüfplatten.....	58
3.3.1 Aufbau der Prüfplatten	58
3.3.2 Spezifikationen der Ausgangsprodukte	61
3.3.2.1 Laminierharze.....	61
3.3.2.2 Verstärkungsgewebe.....	61
3.3.2.3 Wabenkerne.....	63
3.4 Versuchsdurchführung.....	64
3.5 Versuchsauswertung.....	65
3.5.1 Auswertung der Durchbiegung über den Druckverlauf.....	65
3.5.2 Berücksichtigung der Schubverformung	67
3.5.3 Darstellung der Ergebnisse	69
3.5.4 Bewertung der Ergebnisse	73
3.5.4.1 GFK-Wabensandwichplatten	73
3.5.4.2 CFK-Wabensandwichplatten	79
3.5.4.3 AFK-Wabensandwichplatten	80
3.5.4.4 Vergleich zwischen den GFK-, CFK- und AFK-Wabensandwichplatten	81
3.6 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen	83

	Seite
4 Entwicklungssystematik für den Ultraleichtbau in FVK-Wabensandwichbauweise	85
4.1 Gestaltung von Faserverbund-Wabensandwichbauteilen	85
4.1.1 Anwendungsbereiche für Wabensandwichkonstruktionen	85
4.1.2 Möglichkeiten der Formgestaltung	86
4.1.2.1 Platten- und Schalenkonstruktionen	87
4.1.2.2 Wabenkonstruktionen beliebig geformter Körper	87
4.1.2.3 Randgestaltung	89
4.1.2.4 Mehrfachsandwichaufbauten	90
4.1.2.5 Verformen ausgehärteter Platten- und Schalenkonstruktionen	90
4.1.3 Verklebung zwischen Wabenkern und Deckhäuten	92
4.1.4 Gestaltung von Krafteinleitungen	93
4.1.5 Verbindungstechniken	93
4.1.5.1 Nicht lösbare Verbindungen	93
4.1.5.2 Lösbare Verbindungen	95
4.2 Dimensionierung von FVK-Wabensandwichkonstruktionen	96
4.2.1 Dimensionierung der Decklagen	97
4.2.1.1 Auswahl des Decklagenwerkstoffes	97
4.2.1.2 Bestimmung von Laminatstärke und Faserorientierung	99
4.2.2 Dimensionierung des Wabenkerns	102
4.2.2.1 Auswahl des Wabenkerns	102
4.2.2.2 Bestimmung der Wabenkernstärke biegebeanspruchter Träger	104
4.2.2.3 Berücksichtigung asymmetrischer Deckschichtaufbauten bei biegebeanspruchten Trägern	105
4.2.2.4 Berechnungsbeispiel: Sandwichträger mit konstanter Streckenlast	106
4.2.3 Beulnachweis	107
4.2.3.1 Bestimmung des Steifigkeits-Erhöpfungsfaktors κ	108
4.2.3.2 Ermittlung des Beulfaktors k	108
4.2.3.3 Rechnerische Bestimmung des wirksamen Elastizitätsmoduls	112
4.2.3.4 Experimentelle Bestimmung des wirksamen Elastizitätsmoduls	113

	Seite
4.3 Leitregeln zur systematischen Entwicklung von Faserverbund-Wabensandwichkonstruktionen	114
4.3.1 Konzeptionierung	114
4.3.2 Entwurf	114
4.3.3 Detailgestaltung	115
4.3.4 Dimensionierung	116
4.3.5 Herstellung	117
5 Entwicklung des Ultraleichtflugzeuges Silence	118
5.1 Ultraleichtflugzeuge: Begriffsbestimmung	118
5.2 Beschreibung des Ultraleichtflugzeuges Silence	119
5.2.1 Entwicklungsziel	119
5.2.2 Aufbau des Flugzeuges	120
5.2.3 Technische Daten	120
5.2.3.1 Geometriedaten	120
5.2.3.2 Gewichte	121
5.2.3.3 Leistungsdaten	121
5.2.4 Bauausführung	122
5.3 Flugzeugentwurf und Bauteilentwicklung	123
5.3.1 Rumpf	123
5.3.2 Sicherheitscockpit	126
5.3.2.1 Das Monocoque als integrales Sicherheitscockpit	126
5.3.2.2 Anbindung der Sicherheitsgurte	127
5.3.3 Einbau des Rettungsgerätes	128
5.3.4 Tragflügel und Leitwerke	129
5.3.4.1 Aufbau der Tragflügel und Leitwerke in Schalenbauweise	129
5.3.4.2 Befestigung von Tragflügeln und Leitwerken mit dem Rumpf	130
5.3.4.3 Anbindung der Ruderklappen	131
5.3.5 Einziehfahrwerk	132
5.3.6 Antriebseinbau	135
5.3.7 Verstellpropeller	137
5.3.7.1 Aerodynamische Auslegung des Verstellpropellers	137
5.3.7.2 Konstruktiver Aufbau	138

	Seite
5.4 Dimensionierung der Strukturbauteile.....	140
5.4.1 Lastannahmen	140
5.4.2 Formulierung des Laminataufbaus	142
5.4.3 Rechnerischer Festigkeitsnachweis am Beispiel des Tragflügels	143
5.4.3.1 Torsionsfestigkeit der Tragflügelschale	143
5.4.3.2 Beulnachweis für die Tragflügelschale	144
5.4.3.3 Dimensionierung der Holmgurte.....	145
5.4.3.4 Dimensionierung des Holmsteges.....	146
5.5 Formenbau und Bauteilherstellung.....	147
5.5.1 Herstellung der Urmodelle.....	148
5.5.1.1 Tragflügel-Urmodell.....	148
5.5.1.2 Rumpf-Urmodell	149
5.5.2 Herstellung der Negativformen.....	152
5.5.3 Herstellung der Wabensandwichbauteile.....	154
5.5.4 Fertigstellung.....	158
5.5.5 Gewichtsanalyse.....	159
5.6 Erprobung	161
5.6.1 Belastungstests	161
5.6.2 Dynamische Untersuchungen.....	163
5.6.3 Flugerprobung	164
6 Zusammenfassung und Ausblick	166
6.1 Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick	166
6.2 Ausblick	168
7 Verzeichnisse	169
7.1 Formelzeichen und Indizes	169
7.1.1 Lateinische Formelzeichen	169
7.1.2 Griechische Formelzeichen und Sonderzeichen	170
7.1.3 Indizes	171
7.2 Literatur	171