Aachener Berichte aus dem Leichtbau
herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder

Band 4/2016

Jules André Kengmogne Tchakam

**Tragstrukturkonzepte zur gekoppelten Vorauslegung
generischer Faserverbundflügel**

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4822-3

ISSN 2509-663X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

POUR TOI MON FILS

RAPHAEL-MAURICE KENGMOGNÉ-TCHAKAM

PAPA T'AI ME

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand aus meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Während dieser Tätigkeit war ich Mitglied des von der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs SFB-401 *”Strömungsbeeinflussung und Strömungs-Struktur-Wechselwirkung an Tragflügeln”*. In der letzten Förderperiode habe ich im Rahmen des Teilprojekts TP-B9 *”Aeroelastische Experimente im Windkanal und Strukturmodelle elastischer Tragflügel”* Tragstruktur-Konzepte für generische Flügel entwickelt. Ebenfalls im Rahmen des Teilprojekts TP-B1 *”Numerische Aerostrukturdynamik”* des SFB-401 durfte ich bei der Schnittstellen-Definition zur Einbindung solcher Tragflügel-Strukturen mitarbeiten.

Herrn Prof. Dr.–Ing. Hans-Günter Reimerdes möchte ich an dieser Stelle für diese Möglichkeit, sowie die langjährige Betreuung der Themen, meinen Dank aussprechen. Bei Herrn Dr.–Ing. Athanasios Dafnis bedanke ich mich für seine fachliche Unterstützung sowie kritischen Anregungen. Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.–Ing. Kai–Uwe Schröder für die Übernahme der Betreuung. Insbesondere hat seine Courage für einen Motivationsschub gesorgt, sodass die Arbeit fertiggestellt werden konnte. Ebenfalls ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.–Ing Wolf–Reiner Krüger, zunächst für die Übernahme des Ko-Referats, aber vor allem für die sorgfältige Durchsicht der Dissertation. Bei Herrn Prof. PhD Marek Behr bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei meinen Freunden, die mich auf diesem Weg begleitet haben, möchte ich mich bedanken: ganz besonders bei meinem teuren Freund Wolfgang Teuber, für das langjährige Engagement, die kritische Begutachtung der Arbeit und die ausnahmslose Verfügbarkeit. Bei PhD Stephan Kaizik, für die Motivation sowie die Ermutigung, die Arbeit zu Ende zu bringen. Danke an Dipl.-Ing. Raphael Weniger für seine Mitarbeit in der Verfahrensentwicklung. Und besonders auch an Dr.rer.nat Christian Dickopp für seine kompetenten Beratungsgespräche sowie fachliche Unterstützung.

Schließlich bedanke ich mich herzlich bei meiner Frau Sabrina, die mich den langen Weg mitbegleitet hat und mich immer wieder motiviert hat. Sie hat nicht nur Geduld und Ausdauer bewiesen, sondern auch Ihre Liebe durch ihre verständnisvolle Haltung gegenüber den Entbehrungen für die Fertigstellung der Promotion, zum Ausdruck gebracht.

Kurzfassung

Die Entwicklung in der Luftfahrtindustrie ist einer Vielzahl Herausforderungen ausgesetzt. Zur Gewährleistung der strukturellen Integrität muss die Projektierung von Flugzeugen der neuesten Generation, neben den Vergleichsanforderungen, auch weitere Aufgabenbereiche berücksichtigen. Motivation dafür ist vor allem der Druck nach Möglichkeit die Herstellungskosten zu senken. Durch ständige Veränderungen in der Umweltschutzgesetzgebung entsteht außerdem die Notwendigkeit weitere Aspekte, die zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Luftfahrzeugen beitragen, in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Als Beispiele hierzu sind Lärmreduktion sowie CO_2 -Absenkung durch Treibstoffersparnis zu nennen. Die technische Umsetzung einer solch komplexen Aufgabenstellung verlangt in der Strukturkonstruktion eine multidisziplinäre Dimensionierung und Herangehensweise. In dieser Arbeit werden multidisziplinäre Ansätze, wie zum Beispiel Aerostrukturmechanik im Flügelstrukturentwurf, angewendet. Hierbei liegt die Idee zu Grunde, bereits im Vorentwurf Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen, mit denen Tragstrukturkonzepte zur Vorauslegung von Flügeln zu entwickeln sind. Strukturseitig wird im Rahmen der Leichtbauweise von einer Faserverbundkonstruktion ausgegangen. Bei der Strukturanalyse erfolgt der Einsatz eines speziellen Verfahrens, basierend auf einer hybriden Spannungsmethode. Dieser neue und effiziente Ansatz einer parametrischen Finite-Elemente-Methode wird hier erstmalig untersucht und ausgeführt. Die Einbeziehung der Umweltbedingungen erfolgt direkt durch die numerische Berechnung der aerodynamischen Kräfte, sowie deren Übertragung auf die Struktur. Dafür wird in dieser Arbeit zunächst die erforderliche Schnittstelle zwischen Aerodynamik und Struktur definiert. Mit dieser Integration lässt sich ein Erkenntnisgewinn realisieren, der einen direkten Beitrag zur restringierten Optimierung der Traglastspanne liefert. Neue Anforderungen können mit diesem Ansatz integriert werden, ohne die strukturelle Integrität zu beeinträchtigen.

Abstract

The development in aerospace engineering has merged nowadays to become subject to more challenging tasks. In order for instance to ensure the structural integrity of new generation of aircrafts standard requests are supplied with additional functionality requirements, with the purpose of providing added values regarding the performance envelop of the generic airplane. One patent example is the development of the long range transport aircraft A350XWB for with the composite technology is being applied for the first time on the primary structure. The core objectives behind this procedure is to successfully achieve a design-to-cost of the airplane without sacrificing its performances characteristics, moreover to enhance these performances through cutting edge innovative solutions. With respect to the environmental and climatic conditions aspects that shall help improve the ecological friendliness in aeronautics must be integrated in the design, as per aviation authority request. Thus acoustic noise reduction and CO_2 gas emission are some of the urgent issues to be accounted for during the earlier concept phase. In order to accomplish a product design including the above mentioned complexity, a method based on a multidisciplinary design approach is mandatory. The present work addresses such a multidisciplinary approach using a concrete application on aircraft wing structural design and analysis. The basic idea behind this approach is to perform the preliminary design of the wing including the dimensioning, by taking into account various concepts and the response to their environment. Hence the aerodynamics is interpreted as the environment and the resulting load assumption used in the framework of fluid-structure interaction. From the lightweight design point of view composites structural elements are used. To tackle the structural analysis a hybrid stress method is preferred. Here a new approach based on hybrid flux forces is introduced and intensively discussed. Design loads are assumed numerically by means of CFD direct simulation for aerodynamics. Thereafter the loads are transferred to the structure by defining suitable interface conditions using the domain decomposition procedure, well known as partitioned algorithms. With a successful integration new requirements concerning structural integrity can be fulfilled and the consequent restrictions overcome.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Stand der Technik	4
1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit	6
2 Geometrische und strukturelle Aspekte konventioneller Tragflügel	9
2.1 Pfeilung	11
2.2 V-Stellung und Verwindung	12
2.3 Verjüngung	12
2.4 Wölbefekte	14
2.5 Wölbschub	14
3 Strukturmechanische Aspekte anisotroper Tragflügel	17
3.1 Elastizitätsgesetz des Laminatverbundes	18
3.2 Biege-Torsionskopplung von Faserverbundkästen	22
3.3 Aeroelastische Tailoring	24

4	Entwicklung eines computergestützten Flügelstrukturentwurfsverfahrens	27
4.1	Parameterraum Definition	27
4.2	Parametrisierung der Geometrie	28
4.2.1	Rippen-Strategien	29
4.2.2	Stringer-Strategien	30
4.2.3	Holm-Strategien	32
4.2.4	Praktische Beispiele	33
4.3	Erstellung eines Rechenmodells	38
4.3.1	Idealisierung der Rippen	38
4.3.2	Idealisierung der Holme	38
4.3.3	Idealisierung der Deckschale	39
4.3.4	Idealisierung der Stringer	39
4.3.5	Idealisierung der Rippen- und Eckgurte	39
4.3.6	Beispiel	40
4.4	Datenaufbereitung	41
4.5	Abschließende Bemerkungen	42
5	$2D - p$ hybride Elemententwicklung für die Strukturanalyse im Vorentwurf	43
5.1	Konstruktion von Interpolationsfunktionen	44
5.2	Flügelstatik	46
5.2.1	Kinematische Beziehungen	46
5.2.2	Subparametrische Implementierung	47
5.2.3	Ableitung von Spannungsformfunktionen	50
5.2.4	Klassifizierung der Spannungsmoden	54

5.2.5	Statische Modalanalyse zur Optimierung der Spannungsmatrix	55
5.2.6	Hybride Schalenelemente	56
5.2.6.1	Approximation der Membrankräfte	56
5.2.6.2	Approximation der Schalenmomente	57
5.2.6.3	Approximation der Querschubkräfte	57
5.2.6.4	Modifizierte Variationsformulierung	59
5.2.7	Teilhybride Schalenelemente	62
5.2.7.1	Variation der Membrankräfte	62
5.2.7.2	Variation der Schalenmomente	63
5.2.7.3	Variation der Querschubkräfte	64
5.2.7.4	Aufbau der Gesamtsteifigkeitsmatrix	64
5.2.8	Erweitertes Faserverbundbalkenelement	65
5.2.9	Element Anreicherung	66
5.2.10	Abschließende Bemerkungen	68
5.2.11	Verifikationsrechnung	68
5.2.11.1	Analytische Validierung	68
5.2.11.2	Orthotroper Rechteckflügel	73
5.3	Flügelstabilität	79
5.3.1	Berücksichtigung von geometrischen Nichtlinearitäten	79
5.3.2	Beugleichung	80
5.3.3	Balkenstabilität	84
5.3.4	Verifikationsrechnungen	86
5.3.4.1	Analytische Validierung	86

5.3.4.2	Lineare Beulrechnung	87
5.4	Flügeldynamik	90
5.4.1	Schalenbewegungsgleichung	90
5.4.2	Balkenbewegungsgleichung	92
5.4.3	Verifikationsrechnungen	93
5.4.3.1	Analytische Validierung	93
5.4.3.2	Orthotroper Rechteckflügel	94
5.5	Numerische Integration	97
5.6	Modellreduktion	97
5.6.1	Statische Kondensation	98
5.6.2	Superelementtechnik	99
5.6.3	Substrukturtechnik	99
5.6.4	Guyan-Reduktion	101
5.6.5	Craig-Bampton-Reduktion	101
5.6.6	Bemerkung	102
6	Numerische Berechnung der aerodynamischen Kräfte	103
6.1	Physikalisches und mathematisches Modell kompressibler Strömungen	104
6.1.1	Navier-Stokes-Gleichungen	104
6.1.2	Stoffgesetze	105
6.1.3	Thermodynamische Beziehungen	106
6.1.4	Turbulenzmodellierung	107
6.1.5	Randbedingungen	108
6.2	Finite-Volumen-Methode	109

6.2.1	Räumliche Diskretisierung	112
6.2.2	Zeitliche Diskretisierung	112
6.2.3	Approximation stationärer Lösungen	113
6.2.4	Beschleunigungsverfahren	113
6.2.5	Parallelisierung	113
6.3	Ermittlung der aerodynamischen Flächenlasten	114
6.4	Beispielrechnung	116
6.4.1	Rechteckflügel in subsonischer Strömung	116
6.4.1.1	Aerodynamische Konfiguration	116
6.4.1.2	Anströmungszustand	116
6.4.1.3	Ergebnisse: Starre Konfiguration	118
7	Übertragung der aerodynamischen Kräfte und Transfer der Deformation	123
7.1	Kopplungsbedingungen	124
7.2	Aspekte der räumlichen Kopplung	125
7.3	Aspekte der zeitlichen Kopplung	125
7.4	Lastprojektion	126
7.5	Transfer der Strukturdeformation	131
7.5.1	Moving–Least–Square–Methode (MLS)	132
7.5.2	Radial-Basis-Funktion-Interpolation (RBF)	135
7.6	Nachführung des Strömungsgitters	137
7.7	Partitionierter Algorithmus	139
7.8	Berechnungsbeispiel	139

8 Untersuchungen	145
8.1 Statische Untersuchungen	145
8.1.1 Berücksichtigung der Pfeilung	145
8.1.2 Berücksichtigung der Verjüngung	148
8.1.3 Effekt der Rippenausrichtung	150
8.1.4 Berücksichtigung von Zwischenholmen	150
8.2 Stabilitätsuntersuchungen	152
8.2.1 Einfluss der Pfeilung	152
8.2.2 Einfluss der Materialanisotropie	154
8.3 Strukturdynamische Untersuchungen	158
8.3.1 Einfluss der Pfeilung	158
8.3.2 Einfluss der strukturellen Kopplung	161
8.4 Aerostrukturmechanische Untersuchungen	164
8.4.1 Orthotrope Pfeilflügel in subsonischer Strömung	164
9 Anwendung	173
9.1 Halbspannflügel eines generischen Großraum-Flugzeugs	174
9.2 Aerodynamische Analyse	176
9.3 Lastübertragung	181
9.4 Spannungsanalyse	183
10 Zusammenfassung und Ausblick	185
Literaturverzeichnis	189
Abbildungsverzeichnis	197

Tabellenverzeichnis	203
A PreSAT	209
A.1 Eingabe	209
A.2 Ausgabe	210
B SolSAT	219
C FLOWer	223