

**Oliver Schöpe**

Untersuchungen von einschnittigen  
Klebeverbindungen unter  
Impactbelastungen

**Diplomarbeit**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

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

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 1999 Diplomica Verlag GmbH  
ISBN: 9783832426859

**Oliver Schöpe**

# **Untersuchungen von einschnittigen Klebeverbindungen unter Impactbelastungen**

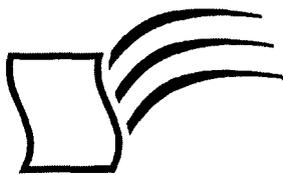


---

Oliver Schöpe

# **Untersuchungen von einschnittigen Klebeverbindungen unter Impactbelastungen**

Diplomarbeit  
an der RWTH-Aachen  
Fachbereich Luft- und Raumfahrttechnik  
August 1999 Abgabe



***Diplomarbeiten Agentur***  
Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey  
Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke  
und Guido Meyer GbR

Hermannstal 119 k  
22119 Hamburg

agentur@diplom.de  
www.diplom.de

ID 2685

Schöpe, Oliver: Untersuchungen von einschnittigen Klebeverbindungen unter Impactbelastungen / Oliver Schöpe -  
Hamburg: Diplomarbeiten Agentur, 2000  
Zugl.: Diplom, 1999

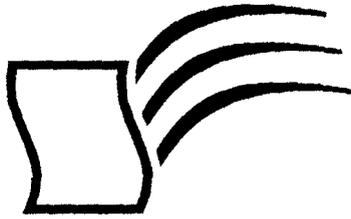
---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey, Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke & Guido Meyer GbR  
Diplomarbeiten Agentur, <http://www.diplom.de>, Hamburg 2000  
Printed in Germany



**Diplomarbeiten Agentur**

## **Wissensquellen gewinnbringend nutzen**

**Qualität, Praxisrelevanz und Aktualität** zeichnen unsere Studien aus. Wir bieten Ihnen im Auftrag unserer Autorinnen und Autoren Wirtschaftsstudien und wissenschaftliche Abschlussarbeiten – Dissertationen, Diplomarbeiten, Magisterarbeiten, Staatsexamensarbeiten und Studienarbeiten zum Kauf. Sie wurden an deutschen Universitäten, Fachhochschulen, Akademien oder vergleichbaren Institutionen der Europäischen Union geschrieben. Der Notendurchschnitt liegt bei 1,5.

**Wettbewerbsvorteile verschaffen** – Vergleichen Sie den Preis unserer Studien mit den Honoraren externer Berater. Um dieses Wissen selbst zusammenzutragen, müssten Sie viel Zeit und Geld aufbringen.

<http://www.diplom.de> bietet Ihnen unser vollständiges Lieferprogramm mit mehreren tausend Studien im Internet. Neben dem Online-Katalog und der Online-Suchmaschine für Ihre Recherche steht Ihnen auch eine Online-Bestellfunktion zur Verfügung. Inhaltliche Zusammenfassungen und Inhaltsverzeichnisse zu jeder Studie sind im Internet einsehbar.

**Individueller Service** – Gerne senden wir Ihnen auch unseren Papierkatalog zu. Bitte fordern Sie Ihr individuelles Exemplar bei uns an. Für Fragen, Anregungen und individuelle Anfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung. Wir freuen uns auf eine gute Zusammenarbeit

### **Ihr Team der *Diplomarbeiten Agentur***

Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey —  
Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke —  
und Guido Meyer GbR —

Hermannstal 119 k —  
22119 Hamburg —

Fon: 040 / 655 99 20 —  
Fax: 040 / 655 99 222 —

agentur@diplom.de —  
www.diplom.de —

1	Einleitung	6
2	Impact bei Faserverbundwerkstoffen	8
	2.1 Faserverbundwerkstoffe, Stand der Technik	8
	2.2 Das Auftreten von Impactbelastungen	11
	2.2.1 Simulierte Impactbelastungen in Versuchen	13
	2.3 Folgen von Impactbelastungen	14
	2.3.1 Einfluß der Impactgeschwindigkeit	17
	2.4 Die Erkennung von Impactschäden und Prüfung von Bauteilen	19
	2.4.1 Sichtkontrolle und Klopfest	20
	2.4.2 Radiologische Verfahren	20
	2.4.3 Akustische Verfahren	22
	2.5 Maßnahmen zur Verbesserung des Impactverhaltens von Faserverbundwerkstoffen	24
	2.5.1 Veränderte Lagenorientierung	25
	2.5.2 Interleafes und Hybridisierung	26
	2.5.3 Dreidimensionale textile Verstärkungshalbzeuge	27
	2.5.4 Z-Fiber	28
3	Berechnungsverfahren	30
	3.1 Generelle Beschreibung der zu berechnenden Konfiguration	30
	3.2 Bruchmechanismen von Faserverbundwerkstoffen unter Impactbelastungen	31
	3.3 Versagenskriterien	34
	3.3.1 Gestaltänderungsenergie-Hypothese (Vergleichsspannung nach Mises)	36
	3.3.2 Einzelschicht-Festigkeitskriterium von Puck	37
	3.3.3 Verbessertes Zwischenfaserbruch-Kriterium nach Puck	40
4	Berechnung einer einschnittigen Klebeverbindung mit dem Übertragungsmatrizenverfahren für die Zweigurtscheibe	45
	4.1 Scheibenbeziehungen	46
	4.2 Gurtbeziehungen	49
	4.3 Herleitung der Differentialmatrix für die Zweigurtscheibe	51
	4.4 Bestimmung der Übertragungsmatrix durch Lösung des Differentialgleichungssystems	53
	4.5 Analytische Berechnung der Längsspannungen $\sigma_x$ an den Grenzflächen Gurt-Kleber	56
	4.6 Ergebnisse der analytischen Rechnung	58
5	Berechnung einer einschnittigen Klebeverbindung mit der Methode der finiten Elemente	69
	5.1 Das zunächst verwendete Gittermodell	74
	5.2 Berechnungen mit dem FE-Programm MARC	75
	5.2.1 Berechnungen mit groben Gittermodell und dem Elementtyp 3 (plane stress)	75
	5.2.2 Berechnungen mit dem groben Gittermodell und dem Elementtyp 11 (plane strain)	80
	5.2.3 Berechnungen mit dem groben Gittermodell und dem Elementtyp 75	80
	5.2.4 Berechnungen mit dem groben Gittermodell und dem Elementtyp 26	80
	5.2.5 Weitere Berechnungen mit einem feineren Gittermodell	81
	5.2.6 Berechnungen mit dem feinen Gittermodell und dem Elementtyp 3 (plane stress)	82
	5.3 Berechnungen mit dem FE-Programm PERMAS	99
	5.3.1 Das FE-Programm PERMAS	99
	5.3.2 Verwendeter Elementtyp	101
	5.3.3 Ergebnisse aus der FE-Rechnung mit PERMAS	101
6	Zusammenfassung und Ausblick	103
7	Literaturverzeichnis	105
8	Anhang	111
	8.1 Beispiel einer Eingabedatei des Programms „KLEVER“	111
	8.2 Beispiel einer Ausgabedatei des Programms „KLEVER“	112
	8.3 Beispiel einer PERMAS *.dat-Datei	113

---

8.4 Beispiel einer PERMAS *.uci-Datei	115
8.5 Beispiel einer PERMAS *.res-Datei	115

## Kurzfassung

Eine der kritischsten Schadensarten in Verbundwerkstoffen ist der Stoß- bzw. Impactschaden z.B. durch Stein- oder Vogelschlag. Aufgrund von entstehenden Delaminationen kann die Druckfestigkeit der geschädigten Strukturen erheblich abnehmen. Für den erfolgreichen Einsatz von Verbundwerkstoffen ist es deshalb erforderlich, den Einfluß von Impactschädigungen auf die Restfestigkeit und Reststeifigkeit abschätzen zu können.

Im ersten Teil der Diplomarbeit wird der Stand der Forschung zum Impactverhalten von Faserverbundwerkstoffen dargelegt. Anhand von Literaturveröffentlichungen werden analytisch / numerische und experimentelle Untersuchungen erläutert.

Im zweiten Teil der Arbeit werden einschrittige Klebeverbindungen mit isotropen Gurten unter einer Impactbelastung berechnet. Als Berechnungsmethoden werden

- eine analytische Berechnung auf Basis der Zweigurtscheibe nach Bansemer mit Hilfe eines vorhandenen, für den Lastfall modifizierten Fortran-Programmes
- FEM-Rechnungen (MARC / PERMAS)
- und Versagenskriterien verwendet.

Die Konfiguration wird als Vorstufe eines Faserverbundes angesehen, wobei die Isotropie der Gurte zu einer Vereinfachung der Berechnung beiträgt. Betrachtet wird dabei der Verlauf der einzelnen Kräfte, Verschiebungen und Spannungen während der Belastung, mit dem Ziel, die für die Delaminationen in Faserverbundwerkstoffen ausschlaggebenden Spannungen bzw. Spannungskombinationen zu ermitteln. Mit verschiedenen Festigkeitskriterien werden die Ergebnisse bewertet, so daß sie den Bruch der Proben möglichst gut erfassen. Letztendlich ist es das Ziel, ein physikalisch mechanisches Verständnis für die Spannungsausbreitung und für die die Delaminationen bewirkenden Spannungen zu entwickeln, so daß später evtl. eine Vorhersage über Delaminationen gemacht werden kann.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und eine kritische Diskussion.

## Abstract

One of the most critical damages of fibre reinforced plastics (FRP) is the impact-damage, caused by e.g. birds or stones on aircrafts. Because of beginning delamination the compressive strength of the damaged structure can decrease significantly. For the successful use of composites it is necessary to evaluate the influence of impact-damage on the remaining strength and stiffness.

The first part of this work explains the actual situation of research concerning the impact-behaviour of FRP. Numerical / analytical and experimental investigations are presented supported by publications.

In the second part a single-lap joint consisting of isotropic beams under a quasi-static impact-load is estimated. Some different kinds of calculations are realized:

- an analytical calculation basing on transfer matrices using an existing but modified Fortran-programm
- finite element analysis (MARC / PERMAS)
- failure criteria

This configuration is considered as a first step of researching composites. Hereby, the isotropic behaviour of the beams makes the calculation more easier. Attention is payed to the development of forces, displacements and stresses during the load. The aim is to determine the stresses or combinations of them that are responsible for delaminations in FRP. Some failure criteria are used to evaluate the results in order to describe the fracture of specimen as well as possible. A physical and mechanical comprehension of stress propagation and stresses, that cause delaminations, is evaluated aiming to predict delaminations in future.

Finally the results are summarized and critically discussed..

# 1 Einleitung

Die Bedeutung von Faserverbundwerkstoffen hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Die erhöhten Festigkeits- und Steifigkeitswerte gegenüber metallischen Werkstoffen machen sie nicht nur für die Luft- und Raumfahrtindustrie unverzichtbar. Dabei weisen sie ein wesentlich geringeres spezifisches Gewicht als Metalle auf. Durch die Wahl der Fasermenge und -orientierung kann ein Werkstoff konstruiert werden, der für einen speziellen Belastungsfall optimiert ist. An weniger belasteten Stellen kann Material eingespart werden, so daß sich das Gesamtgewicht einer Struktur gegenüber einem homogenen Werkstoff enorm reduzieren läßt. Diese Gewichtersparnis spielt in der Luft- bzw. Raumfahrt eine wichtige Rolle, denn weniger Gewicht bedeutet weniger Kraftstoffverbrauch oder höhere Nutzlast. In der Raumfahrt wird zudem weniger auf die Kosten als auf die Gewichtersparnis Wert gelegt. Diese Faktoren spielen bei den Fluggesellschaften die entscheidende Rolle für oder gegen den Kauf eines Flugzeugmusters, denn nur mit einem möglichst effizient operierenden Fluggerät lassen sich entsprechende Gewinne erwirtschaften. Ebenso verhält es sich in der Automobilindustrie. Die mögliche Gewichtseinsparung beziffern Fachleute auf bis zu 60% gegenüber Stahl und selbst im Vergleich mit Aluminium ließen sich noch 40% erreichen [9]. Demgegenüber stehen die erhöhten Werkstoffkosten und der Mehraufwand in der Auslegung, Berechnung und Fertigung. Es ist jeweils abzuwägen, ob sich der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen bei bestimmten Bauteilen lohnt.

Da die Festigkeitskennwerte der Faserverbundwerkstoffe teilweise wesentlich über denen der metallischen Werkstoffe liegen, insbesondere auch größer sind als bei Stahl, ist ein Auslegen von FVK-Strukturen auf Festigkeit kein Problem. In der Regel ist das Kriterium zur Auslegung die Steifigkeit, d.h. die Durchbiegung oder Verdrehung eines Bauteils im Betrieb. Eine weitere Beanspruchungsart, die bis heute noch nicht berechnen- und vorhersagbar ist, ist die Stoß- oder Schlagbeanspruchung, der sog. Impact. Gerade gegenüber dieser Beanspruchung sind die Faserverbund-Laminat sehr empfindlich. Dies stellt oft eines der größten Hemmnisse für ihren Einsatz in Bauteilen dar, bei denen solche Beanspruchungen nicht auszuschließen sind [6]. In dieser Arbeit wird im ersten Teil eine Zusammenfassung der in der Literatur veröffentlichten Methoden und Grundlagen für die Erfassung dieser Impactbelastungen gegeben. Außerdem wird ein Überblick über das Auftreten von Impactbelastungen im Betrieb von Bauteilen gegeben.

Durch den vermehrten Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, aber auch aufgrund neuer Klebstoffe und -verfahren, wird in der Fertigung heute eine Vielzahl von zu verbindenden

Bauteilen geklebt. Das Kleben wird sowohl als eigenständiges Fügeverfahren, als auch im Verbund mit herkömmlichen Verbindungsarten, z.B. Schrauben, Nieten, Schrumpfen, eingesetzt. Gerade für den konsequenten Leichtbau ist das Kleben ein sehr wichtiges Fügeverfahren, besonders wenn es um die Krafteinleitung in Faserverbundbauteile geht. Ebenso sind Reparaturen bei Faserverbundwerkstoffen normalerweise nur mit Hilfe geeigneter Klebstoffe durchzuführen, da ein Anbohren von Faserverbundwerkstoffen z.B. zum Aufbringen eines Dopplers als nicht fasergerecht gilt. Dabei werden Fasern beschädigt und die Struktur nochmals geschwächt.

Auch eine Klebeverbindung muß gewissen Belastungen standhalten. Ein gebräuchliches Verfahren zur Berechnung von Klebeverbindungen ist das Übertragungsmatrizenverfahren. In dieser Diplomarbeit wird dieses Rechenverfahren mit Hilfe eines am Institut für Leichtbau vorhandenen Fortran-Programmes für eine einschnittige Klebeverbindung verwendet, um die Schnittgrößen an einer beliebigen Stelle der Klebung zu ermitteln. Das Verfahren beschränkt sich auf eine zweidimensionale Betrachtung. Zwei aufeinander geklebte Streifen eines homogenen Materials (in diesem Fall Stahl) werden an den Enden fest eingespannt und in der Mitte quasi statisch belastet. Das Programm gibt, bei vorhandenen Randbedingungen wie Probenabmessungen und Belasung alle für eine Auswertung nötigen Größen über der Probenlänge aus. Dazu gehören für die Gurte die Verschiebungen in x- und y-Richtung, der Verdrehwinkel, die Quer- und Längskräfte, die Biegemomente, sowie Schäl- und Schubspannungen für die Klebeschicht. Das Ziel ist es, später Aussagen über die Spannungsverteilung innerhalb eines Laminates bei der Delamination von Faserverbundwerkstoffplatten unter Impactbelastung machen zu können.

Weiterhin wird die Klebeverbindung mit derselben Belastung mit Hilfe der FE-Programme MARC und PERMAS untersucht. Diese Berechnungen sollen die Ergebnisse des Fortran-Programmes bestätigen. Es werden verschiedene Elementtypen und Gittermodelle verwendet. Dadurch können unterschiedliche Einflußfaktoren auf die Spannungsverläufe untersucht werden, da bei allen drei Programmen mehrere Einstellungsmöglichkeiten gegeben sind. Mit der Auswertung der Vielzahl von Daten erhofft man sich, die Vorgänge in einer Klebeverbindung während eines Impacts verstehen und berechnen zu können. Als Ziel für weitere Untersuchungen ist die Übertragung der erhaltenen Ergebnisse der Klebeverbindung mit isotropen Gurten auf Faserverbundwerkstoffe geplant, so daß später das Verhalten von Laminaten unter Impactbelastung berechnen- und damit vorhersagbar wird.