

IVW - Schriftenreihe Band 79

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Michael Kaiser

**Zur Anwendung von kohlenstoff-
faserverstärktem Kunststoff im
Hochleistungs-Rahmenbau von
Sportfahrrädern**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.ddb.de>>.

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb
Erwin-Schrödinger-Straße
TU Kaiserslautern, Gebäude 58
67663 Kaiserslautern
<http://www.ivw.uni-kl.de>

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D 386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2008

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1615-021X

ISBN 978-3-934930-75-9

ISBN 3-934930-75-1

Zur Anwendung von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff im Hochleistungs-Rahmenbau von Sportfahrrädern

Vom Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Michael Kaiser
aus Kaiserslautern

Tag der mündlichen Prüfung: 12.10.2007

Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. A. K. Schlarb
1. Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. N. Himmel
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. G. Ziegmann

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Vorwort.....	III
Kurzfassung.....	V
Abstract.....	VII
Abkürzungen und Begriffe, Koordinatensysteme, Symbole, Indizierung	IX
1 Einleitung	1
1.1 Leichtbau im Radsport	1
1.2 Zielsetzung	7
2 Anforderungen an Fahrradrahmen.....	9
3 Werkstoffe im Fahrradrahmenbau.....	13
3.1 Metallische Werkstoffe.....	13
3.2 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	16
3.3 Eigenschaften verschiedener Werkstoffe.....	19
4 FKV-Bauweisen im Fahrradrahmenbau	25
4.1 Klassifizierung von Bauweisen	26
4.2 Klebeverbindungen für Rahmen in Differentialbauweise	28
4.2.1 Muffenverbindungen.....	29
4.2.2 Verklebung	32
4.2.3 Tube-to-tube-Verbindung	32
4.3 Fertigungsverfahren.....	34
4.3.1 Handlaminieren	34
4.3.2 Schlauchaufblasverfahren	35
4.3.3 Sonstige Verfahren.....	36
5 Dimensionierung von Schalenstrukturen aus endlosfaser-	
 verstärktem Kunststoff.....	39
5.1 Annahmen bei der Laminatbetrachtung.....	39
5.2 Optimierung mit parametrischen Geometrie-FE-Modellen.....	40
5.2.1 Optimierung der Strukturgestalt.....	43
5.2.2 Optimierung der Laminatkonfiguration.....	48
5.2.3 Verwindungssteifigkeit eines Rennradrahmens.....	52
5.3 Einzelschichtbasierte Festigkeitsanalyse.....	60
5.3.1 Modell zur einzelschichtbasierten Festigkeitsanalyse	63

5.3.2	Verifizierung des Festigkeitsanalysewerkzeugs	71
6	Rahmenentwicklungen und Ergebnisse	79
7	Transversale Stoßeinwirkung auf Fahrradrahmen	83
7.1	Versuche zur Simulation des Umfallens von Rennrädern.....	86
7.2	Schäden an Rohrprobekörpern durch Stoßeinwirkung	90
7.3	Einfluss von Impaktschäden auf die Lebensdauer.....	99
8	Diskussion.....	105
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	111
10	Literaturverzeichnis.....	115

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung „Berechnung und Konstruktion“ der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH an der Technischen Universität Kaiserslautern in den Jahren 2002-2006.

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr.-Ing. habil. N. Himmel, der es mir erst ermöglicht hat, diese Arbeit anzufertigen und mich während meiner Zeit am Institut in jeder Hinsicht unterstützte, ohne dabei meine Entfaltungsmöglichkeiten einzuschränken. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Ziegmann für die Übernahme des zweiten Gutachtens und Herrn Prof. Dr.-Ing. A. K. Schlarb für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission herzlich danken.

Weiterhin geht mein Dank an die Canyon Bicycles GmbH für die hervorragende Zusammenarbeit und das außergewöhnlich konstruktive Arbeitsklima sowie an die Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation für die finanzielle Unterstützung.

Schließlich möchte ich meinen Vorgesetzten und allen Mitarbeitern der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH danken, insbesondere den Mitarbeitern in der Abteilung „Berechnung und Konstruktion“, für Ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung sowie die intensiven Diskussionsrunden. Mein Dank geht ebenfalls an alle meine Praktikanten, Studien- und Diplomarbeiten für Ihre fachliche Mitarbeit.

Meinen Eltern und meiner Schwester danke ich herzlich für Ihre finanzielle und moralische Unterstützung während meines Studiums. Meiner Ehefrau Natalie Kaiser danke ich ganz besonders für den notwendigen Rückhalt und die tatkräftige Unterstützung und schließlich möchte ich meinem Sohn Luca für sein großartiges Verständnis während dieser Zeit danken.

Für meinen Vater Richard Kaiser

Kurzfassung

Faser-Kunststoff-Verbunde sind aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften und Formgebungsmöglichkeiten der Trendwerkstoff im Rahmenbau von Hochleistungs-Sportfahrrädern. Hierbei ermöglicht die zunehmende Berücksichtigung von Leichtbau-Technologien eine Erhöhung der Leistungs-Gewichts-Relation, um den stetig wachsenden Anforderungen an die Fahreigenschaften, die Haltbarkeit und das Gewicht gerecht zu werden.

Ein geschichtlicher Rückblick über die letzten Jahrzehnte im Fahrradrahmenbau zeigt eine deutliche Gewichtsreduktion bei steigender Funktionalität. Besonders der Einsatz neuartiger Werkstoffe ermöglichte immer wieder eine wesentliche Erhöhung der Leichtbaugüte. In den Anfängen begannen die Rahmenhersteller mit Gusseisen, anschließend wurde Stahl verwendet und schließlich Leichtmetalle, wie Aluminium. Die derzeit leichtesten Rahmen werden aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff gefertigt.

Die Anwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden ist deutlich komplexer und fordert eine integrierte Betrachtungsweise von den Werkstoffen über die Bauweise, der Fertigungstechnologie sowie der Bauteilprüfung. Die erzielbare Leistungsfähigkeit eines Hochleistungs-Rahmens wird hierbei wesentlich in der Konstruktions- und Dimensionierungsphase vorgegeben. Eine Übersicht über derzeitige Bauweisen und Fertigungstechnologien zeigt deren spezifische Eigenschaften.

Um in der Entwicklung eine möglichst gute Lösung innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters zu erreichen, können praktikable und effiziente Simulationswerkzeuge einen erheblichen Beitrag leisten. Hierzu wurde ein Werkzeug entwickelt, welches mit Hilfe eines Gradientenverfahrens an parametrischen Geometrie FE-Modellen zur Gestaltoptimierung und Optimierung der Laminatkonfiguration angewendet werden kann. Dieses ist auf in Differentialbauweise gefertigte Rahmen ausgerichtet und berücksichtigt in besonderem Maße die werkstoff- und fertigungsspezifischen Anforderungen von Faser-Kunststoff-Verbunden.

Zur Verbesserung der Festigkeitsvorhersage dient ein Modell zur vollständigen schichtenweisen Bruchanalyse, welches aus den Bausteinen Spannungsermittlung mit Berücksichtigung werkstofflicher Nichtlinearitäten, Festigkeitskriterium mit Unterscheidung der Bruchtypen Zwischenfaserbruch und Faserbruch sowie Steifigkeitsdegradation der Einzelschicht nach Eintritt von unkritischen Matrixbrüchen besteht. Das

Modell erlaubt die Vorhersage des gesamten Schädigungsprozesses unter quasi-statischer Belastung vom Erstsichtversagen bis hin zum Laminatversagen. Weiterhin wurde das Modell in ein kommerzielles FE-Programm implementiert und erlaubt die Analyse von komplex geformten Strukturen.

Unter Anwendung der Simulationswerkzeuge konnten drei Hochleistungs-Rahmen in Differentialbauweise entwickelt werden, die weltweit zu den leichtesten und steifsten gehören. Hierbei lieferte das Optimierungswerkzeug die Ausgangsgestalt sowie die in den Rohren notwendige Laminatkonfiguration zur Erreichung höchstmöglicher Steifigkeits-zu-Gewichtsverhältnisse. Aufbauend auf den Erkenntnissen erfolgte die detaillierte Rahmenkonstruktion. Kritische Bereiche am Rahmen konnten durch die abschließende Anwendung des Festigkeitsanalysewerkzeugs aufgedeckt und beseitigt werden. Es konnte eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Festigkeitsanalysewerkzeugs mit Prüfstandsversuchen gezeigt werden. Die erzielten herausragenden Fahreigenschaften und die Haltbarkeit der entwickelten Rahmen konnten sowohl auf Prüfständen als auch im Alltag bereits ausgiebig unter Beweis gestellt werden.

Der Einfluss von transversalen Stoßeinwirkungen auf Fahrradrahmen wurde an Sturzversuchen an kompletten Rennrädern sowie an repräsentativen Ober- und Unterrohren aus Aluminium und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff untersucht und die auftretenden Schädigungen ermittelt. Hierbei zeigte sich, dass insbesondere an Rahmen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff nicht sichtbare Schäden bereits bei geringsten Stoßeinwirkungen auftreten, unabhängig vom verwendeten Fasertyp. Durchgeführte zyklische Prüfungen an vorgeschädigten Rennradrahmen unter geringer Stoßeinwirkung zeigten keinen messbaren Verlust an Steifigkeit oder Haltbarkeit der untersuchten Rahmen. Untersuchungen zum Einfluss des Fasertyps auf die Impakteigenschaften zeigten deutliche Unterschiede bei den aufgetretenen visuell erkennbaren Schäden.

Abstract

Fiber reinforced plastics are the trend material for high-performance bicycle frames. The technical reasons are primarily the excellent mechanical properties and the possibility to realize structures with complex shapes. The enhanced application of lightweight construction technologies allows an increase of the performance-to-weight ratio to achieve the continuous increasing requirements on riding characteristics, durability and lightweight.

A historical review over the last decades of frame building shows a significant weight reduction by increased functionality. Especially the employment of new materials often permitted a significant improvement in the lightweight performance. At the beginning, the frame manufacturing started with cast iron, followed from steel up to the light metals. Presently, the lightest frames are made of carbon fiber reinforced plastics. An overview over currently used metallic and non-metallic frame materials clarifies their mechanical properties and suitable fields of application.

The application of fiber reinforced plastics is more complex compared to metals and demands a very close interaction between all disciplines involved in the development process such as material science, design, manufacturing and testing. The achievable performance considerably depends on the selected design and the accuracy of dimensioning in the development period. A review of existing design practices and corresponding manufacturing technologies explains their specific attributes.

Practicable and efficient simulation programs contribute to find a reliable solution in the product development within a given time frame. A developed tool based on parametric geometry FE-models allows the optimization of the frame shape as well as the laminate configuration in each frame tube. The tool assumes frames in a differential design and considers especially the material and manufacturing requirements of fiber reinforced plastics.

Furthermore, a strength simulation tool for anisotropic multi-axial and multiply layered laminates was developed which allows a lamina-by-lamina fracture analysis. The tool consists of three modules: i.e. the determination of stress distribution considering material non-linearities, strength criteria allowing a differentiation of inter-fiber failure and fiber failure as well as a degradation model characterizing matrix cracking compatible with the damage conditions. The tool predicts the complete damage process

from the first ply failure to the last ply failure of a laminate under static load. In addition, the tool is implemented in a FE-code allowing the analysis of complex formed structures.

Utilizing the simulation tools, three high-performance bicycle frames in differential design were developed which belong to the lightest and stiffest worldwide. The optimization tool provided the basic shape and laminate configuration in each tube to achieve the maximal stiffness-to-weight ratio. The detailed frame designs are based on the determined basic shapes. Highly stressed spots including the kind of lamina failure were detected with the strength simulation tool and adequate solutions were developed. A comparison between the strength prediction and the experiment under frontal load showed a good agreement. Meanwhile, the excellent riding performance and durability was proven on several test rigs as well as in extensive practical riding tests.

The influence of transverse impact loads on lightweight bicycle frames made of aluminum and carbon fiber reinforced plastics was shown in falling tests of complete road bikes and on adequate tubular substructures. Visually not observable damages occurred by small impact loads, independent from the carbon fiber used. Examinations under fatigue load yield in the result that visually not observable damages had none measurable influence on the stiffness and fatigue behavior on the investigated frames. Whereas the fiber type, intermediate-modulus and high modulus fibers, influences considerably the initial observable damages.

Abkürzungen und Begriffe, Koordinatensysteme, Symbole, Indizierung

Abkürzungen und Begriffe

CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
EP	Epoxidharz
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HR40-EP	CFK-Prepreg mit Mitsubishi HR40-CF-Faser in Epoxidharz
IM600-EP	CFK-Prepreg mit Toho-Tenax IM600-CF-Faser in Epoxidharz
KOS	Koordinatensystem
max.	Maximal
min.	Minimal
MSV	Mehrschichtverbund
MTB	Mountainbike
RR	Rennrad
SA	Standardabweichung
STW	Stiffness-to-weight-Koeffizient
UD	unidirektional

Koordinatensysteme

x, y, z	globales kartesisches Laminatkoordinatensystem
x_1, x_2, x_3	lokales kartesisches Einzelschichtkoordinatensystem, x_1 parallel zur Faserrichtung, x_2 quer zur Faserrichtung in der Schichtebene, x_3 quer zur Faserrichtung normal zur Schichtebene
x_1, x_n, x_t	lokales auf Bruchebene bezogenes kartesisches Koordinatensystem, x_1 parallel zur Faserrichtung, x_n quer zur Faserrichtung und normal zur Schnitt- oder Bruchebene, x_t quer zur Faserrichtung in der Schnitt- oder Bruchebene

Lateinische Symbole

a	[%]	Anteil 0°-Schichten
b	[m/s ²]	Beschleunigung
C		Federsteifigkeit zur Charakterisierung von Fahrradrahmen
d	[1]	Degradationsfaktor zur Beschreibung der Reststeifigkeit
e	[1]	Exponent der modifizierten Ramberg-Osgood-Gleichung
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
f_E	[1]	Werkstoffanstrengung
F	[N]	Kraft
F_{Ziel}		Zielfunktion des Optimierungsalgorithmus
g	[1]	Gewichtungsfaktoren
G	[MPa]	Schubmodul
h	[1]	Bewertungsdaten
m	[g]	Masse
n	[1]	Anzahl der Berechnungsschritte oder Anzahl der Lastzyklen
p	[1]	Neigungsparameter des Bruchkörpers (Wirkebenenkriterium von Puck)
R	[MPa]	Festigkeit
R^A	[MPa]	Bruchwiderstand der Wirkebene (Wirkebenenkriterium von Puck)
$R_{p0,2}$	[MPa]	technische Streckgrenze von Metallen
s	[mm]	Eindringtiefe des Impaktors
t	[mm]	Laminatdicke
v	[m/s]	Geschwindigkeit
$Var_{i,j}$	[mm]	Designparameter Scheiteldurchmesser
$Var_{i,WD}$	[mm]	Designparameter Wanddicke
Var_{step}		Schrittweite Optimierungsalgorithmus

Griechische Symbole

α	[1/K]	Temperaturausdehnungskoeffizient
γ	[%]	Schiebung

ε	[%]	Dehnung
ΔSTW		Gradient STW
φ	[%]	Faservolumengehalt
μ_{MW}	[1]	gewichteter Mittelwert
ν	[1]	große Querkontraktionszahl
θ	[°]	Winkel zwischen x_2 - und x_n -Richtung
ρ	[g/cm ³]	Dichte
σ	[MPa]	Normalspannung
σ_p	[MPa]	freier Parameter der modifizierten Ramberg-Osgood-Gleichung
τ	[MPa]	Schubspannung
ξ	[1]	Exponent der Abminderungsfunktion η
ξ_p	[1]	freier Parameter der modifizierten Ramberg-Osgood-Gleichung

Indizierung

Hochgestellte Indices

A	action plane, auf Wirkebene bezogen
t	unter Zugbeanspruchung
c	unter Druckbeanspruchung

Tiefgestellte Indices

A	Mode A betreffend
B	Mode B betreffend
f	Faser
fp	fracture plane, auf Bruchebene bezogen
FPF	first ply failure
ges	auf gesamten Fahrradrahmen bezogen
Imp	Impakt
Iter	Iterationen
LK	Lenkkopf
LPF	last ply failure

m	Matrix
max	Maximal
me	Metall
min	Minimal
n	quer zur Faserrichtung normal zur Schnitt- oder Bruchebene
r	Rest
R	auf Rohre bezogen
s	symmetrisch
S	Sekantenmodul
t	quer zur Faserrichtung in Schnitt- oder Bruchebene; theoretisch
T	Tangentenmodul
TL	Tretlager
ult	ultimate, zum Bruch führend
x	parallel zur globalen x-Richtung
y	parallel zur globalen y-Richtung
z	parallel zur globalen z-Richtung
0	auf Ausgangssystem bezogen
1	parallel zur Faserrichtung
2	quer zur Faserrichtung in der Schichtebene
3	quer zur Faserrichtung, normal zur Schichtebene
	parallel zur Faserrichtung
⊥	quer zur Faserrichtung

1 Einleitung

1.1 Leichtbau im Radsport

Die Erfindung des Fahrrads ist eine der bedeutendsten technischen Errungenschaften der Menschheit. Das Fahrrad ist die wohl meistgebaute Maschine der Welt. Über eine Milliarde Menschen besitzen ein Fahrrad, mit dem sie zur Arbeit fahren, Lasten transportieren oder ihre Freizeit gestalten. Damit ist das Fahrrad das am weitest verbreitete Fortbewegungsmittel sowie die energieeffizienteste Fortbewegungsart (Bild 1). Das Fahrrad wiegt nur ein Bruchteil unseres Körpergewichts und vervielfacht etwa unsere Fortbewegungsgeschwindigkeit bei gleicher Anstrengung [1].

Der genaue Zeitpunkt der Erfindung des Fahrrads ist nicht eindeutig belegt, weil der Begriff „Fahrrad“ mit der Entwicklung des Produktes geprägt wurde und erst im Jahre 1885 in Übereinkunft mit den Radvereinen eingeführt wurde. Heute wird das Fahrrad als „ein zweirädriges, einspuriges Fahrzeug, das mit Muskelkraft durch Tretkurbeln angetrieben wird“, definiert [2]. Dabei waren das „zweirädrige, einspurige Fahrzeug“ und der Antrieb „mit Muskelkraft durch Tretkurbeln“ zwei Entwicklungstendenzen, aus deren Kombination das Fahrrad entstanden ist.

Als Urknall des Fahrrads kann die Laufmaschine (Draisine) bezeichnet werden, die im Jahre 1817 vom badischen Forstbeamten Karl von Drais erfunden wurde [3], siehe Bild 2 links. Etwa ein halbes Jahrhundert verging, bevor erstmals Tretkurbeln mit Pedalen am Vorderrad befestigt wurden und damit der Fußkontakt zur Fahrbahn verloren ging. Wer als erstes die Tretkurbeln mit Pedalen befestigte, ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Die Fahrzeuge wurden Veloziped genannt. Der Nachteil bestand darin, dass sie nur über ein vorgegebenes Übersetzungsverhältnis verfügten; eine Pedalumdrehung bedeutete eine Radumdrehung. Die effektivste Möglichkeit zur Erhöhung der Geschwindigkeit bestand zunächst in der Vergrößerung des Durchmessers des angetriebenen Rades. Aus dieser Entwicklungstendenz entstanden um 1870 die Hochräder, wie in Bild 2, rechts, zu sehen ist, deren Vorderraddurchmesser bis zu 125 cm betrug. Eine weitere wichtige Voraussetzung für das Hochrad war die Erfindung gespannter, zugbelasteter Stahlspeichen von Eugène Meyer, die dem Fahrrad außerdem zu geringem Gewicht und zu besonders elegantem, zierlichen Aussehen verhalfen. Mit den Hochrädern konnten Geschwindigkeiten erreicht werden, die deutlich über 40 km/h lagen.

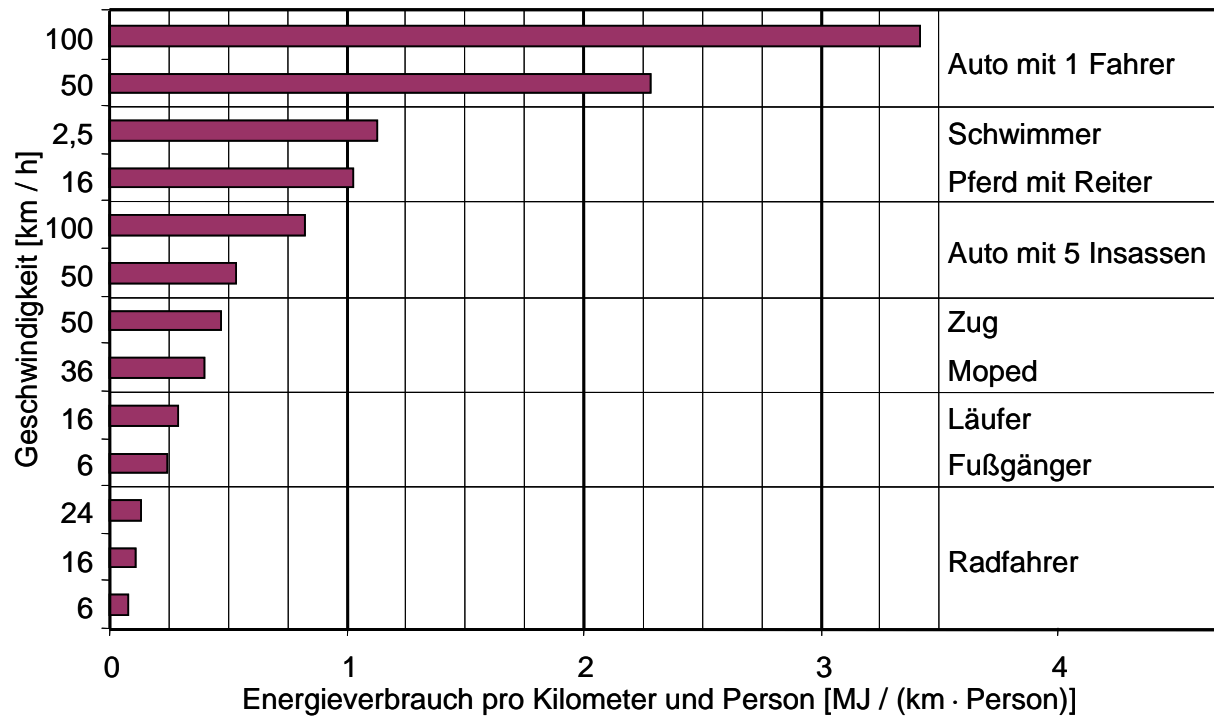


Bild 1: Energiebedarf unterschiedlicher Fortbewegungsarten [1]

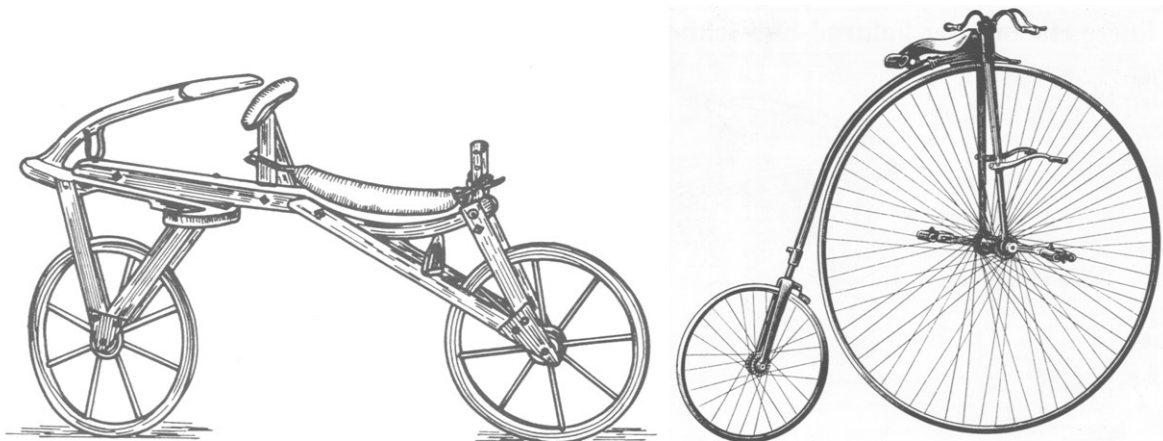


Bild 2: LaufRad des Freiherrn von Drais aus dem Jahre 1817 und Hochrad aus dem Jahre 1877

Allerdings erforderte das Fahren aufgrund der ungünstigen Höhe des Massenschwerpunkts ein hohes Maß an Mut und Geschicklichkeit. Auch Bremsmanöver oder Straßenunebenheiten bargen die große Gefahr eines Sturzes oder Überschlagens. Um diese Gefahr zu reduzieren, musste die Höhe des Massenschwerpunkts verringert werden.

Als Lösung wurde der Kettenantrieb eingesetzt, welche die Kraft ab 1886 auf das Hinterrad übertrug. Dadurch konnte das gewünschte Übersetzungsverhältnis einge-

stellt werden. Von den verschiedenen Konstruktionen erlangte der Rover, heutiger Automobilbauer, die größte Bekanntheit. Er gilt als Vorläufer des heutigen modernen Niederrads und das Konzept hat sich bis heute nicht verändert.

Zwischen 1890 und 1900 wurde das Fahrrad zu dem, was das Auto heute ist: Pferdeersatz, Wirtschaftsfaktor und Statussymbol. Radfahren führte zu Umsatzeinbrüchen bei Theatern, Uhrmachern, Friseuren, Schneidern und Musikgeschäften. Der Münchner Verleger Paul von Salvisberg brachte den rapiden Wandel auf den Punkt: „Vor kurzem fragte man noch skeptisch: Was, Sie radeln? – Heute heißt es: Ja was, ist's möglich, Sie radeln nicht? Und im Stillen zieht der mitleidige Frager bereits seine Schlüsse über die offenbar gestörte Gesundheit oder das Spießbürgertum des oder der Gefragten!“ [4].

Schon in der Entstehungsphase des Fahrrades wurden Radvereine gegründet und Rennen durchgeführt, welche zügig an Popularität gewannen. Eines der ersten fand in München im Jahr 1826 statt, an dem 26 Laufräder teilnahmen. Um 1880 traten die ersten Berufsfahrer in Konkurrenz zu Amateuren an [4].

Heute werden verschiedenste Fahrradtypen angeboten, die den jeweiligen Verwendungszweck bestmöglich erfüllen sollen. Die Übergänge zwischen den Bereichen sind fließend und es gibt keine einheitliche Benennungssystematik. Die Fahrradtypen können in Cityräder, Trekkingräder, Tourenräder hin zu reinen Sportgeräten wie BMX-Räder, Rennräder (RR) oder Mountainbikes (MTB) unterteilt werden. Neben den konventionellen Rädern haben sich auch weitere Sonderkonstruktionen, wie Liegeräder und Falträder, am Markt etabliert [5].

Insbesondere bei muskelbetriebenen Geräten gewinnt die Forderung nach Gewichtsminimierung und Leichtbau immer mehr an Bedeutung und wird im Hochleistungs-Radsport zunehmend erforderlich [6]. Wog ein Hochrad mit schmiedeeisernem Rahmen noch ca. 35 kg [4], liegt das Gewicht eines Rennrades (RR), wie es im heutigen Rennbetrieb eingesetzt wird, bei ca. 7,5 kg. Zusätzlich zur Gewichtsreduzierung stiegen die Funktionalität, bspw. Schaltung und Bremsen, und die Fahreigenschaften. Die Erhöhung der Leistungs-Gewichts-Relation ist nur durch eine zunehmende Anwendung moderner Technologien im Sportgerätebau möglich [7]. Wird in diesem Zusammenhang von Leichtbau gesprochen, so ist dieser generell charakterisiert durch das Ziel, das Gewicht zu minimieren, ohne die Funktionalität der Konstruktion zu schmälern.

Die Verringerung der Strukturmasse lässt sich durch die folgenden Konzepte erreichen [29]:

- **Materialleichtbau:** Verwendung von Werkstoffen mit geringer Dichte und mit hoher spezifischer Steifigkeit und Festigkeit
- **Strukturleichtbau:** Realisierung fortschrittlicher und problemangepasster Strukturen
- **Systemleichtbau:** Erhöhung der Funktionsintegration zur Reduzierung der Anzahl der Einzelstrukturen

Ein Hochleistungsfahrrad beinhaltet die verschiedensten Werkstoffe von Stahl über Aluminium, Titan, Magnesium bis hin zu Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV). Insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), die sich durch ihre hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit auszeichnen, kommen vermehrt zur Anwendung und lösen Aluminium, das seinerseits im letzten Jahrzehnt Stahl fast vollständig ersetzt hat, zunehmend als Rahmenwerkstoff im höheren Preissegment ab. Bild 3 zeigt ein zeitgemäßes Hochleistungs-Rennrad mit einem Gesamtgewicht von 6,58 kg ohne Pedale [8], [9]. Rahmen, Gabel, Laufräder als auch die Kurbeln sind bereits aus CFK gefertigt. Die größten Massen bilden die Rahmen-Gabel Einheit mit Steuersatz (Chassis) mit 1,46 kg (22%) und die Laufräder mit Schnellspannern 1,16 kg (18%). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Gewichtsverteilung des Rennrades.



Bild 3: Hochleistungs-Rennrad mit einem Gesamtgewicht von 6,58 kg ohne Pedale [8], [9]

Tabelle 1: Massenverteilung des Hochleistungs-Rennrads

Bauteil	Masse [g]	Bauteil	Masse [g]
Rahmen	1068	Schaltaußenhülle Umwerfer	20
Gabel	310	Schaltaußenhülle Schaltwerk	36
Steuersatz	78	Schaltinnenzug Umwerfer	14
Spacer	16	Schaltinnenzug Schaltwerk	16
Klemmkonus	34	Sattel	83
Lenker inkl. Lenkerband	212	Sattelstütze	178
Pedale	230	Sattelklemme	14
Brems-/Schalthebel links	212	Lauftrad vorne (VR)	470
Brems-/Schalthebel rechts	212	Lauftrad hinten (HR)	636
Kettenradgarnitur		Schnellspanner VR	22
inklusive Innenlager	812	Schnellspanner HR	28
Schaltwerk	182	Bremsaußenhülle VR	28
Umwerfer	74	Bremsaußenhülle HR	46
Zahnkranz	188	Bremsinnenzug VR	10
Kette	252	Bremsinnenzug HR	18
Vorderradbremse	160	Schlauchreifen	280
Hinterradbremse	154	Schmiermittel und Klebekitt	10
		Gesamtmasse	6580

Die in den letzten Jahren zunehmende Beliebtheit von CFK als Fahrradrahmenwerkstoff kann den geschätzten Werten aus Bild 4 entnommen werden. Hieraus lässt sich eine Verdoppelung der Stückzahlen innerhalb von zwei Jahren feststellen und der Trend hält weiterhin an. Der CFK-Bedarf für Rahmen und Gabeln für den RR- und MTB-Bereich liegen nach eigenen Schätzungen bei ca. 1.400 t für das Jahr 2007. Andere Fahrradkomponenten wie Laufräder, Lenker, Sattelstützen, usw. aus CFK sind in der Schätzung nicht enthalten. Weiterhin werden bereits erste Rahmen für City- und Fitness-Räder aus CFK gefertigt. Das bestehende Marktpotenzial wird aus den Fahrradbeständen deutlich, schließlich besitzen weltweit mehr als eine Milliarde Menschen und ca. 65 Millionen in Deutschland ein Fahrrad (ZIV [10]). Ständig steigende Energiepreise werden den Stellenwert des Fahrrades als Verkehrsmittel im Nahverkehr in Zukunft deutlich ansteigen lassen.

Bild 5 zeigt die Bezeichnung der Rahmenteile am Beispiel eines RR-Rahmens, wie sie im nachfolgenden Text verwendet werden.

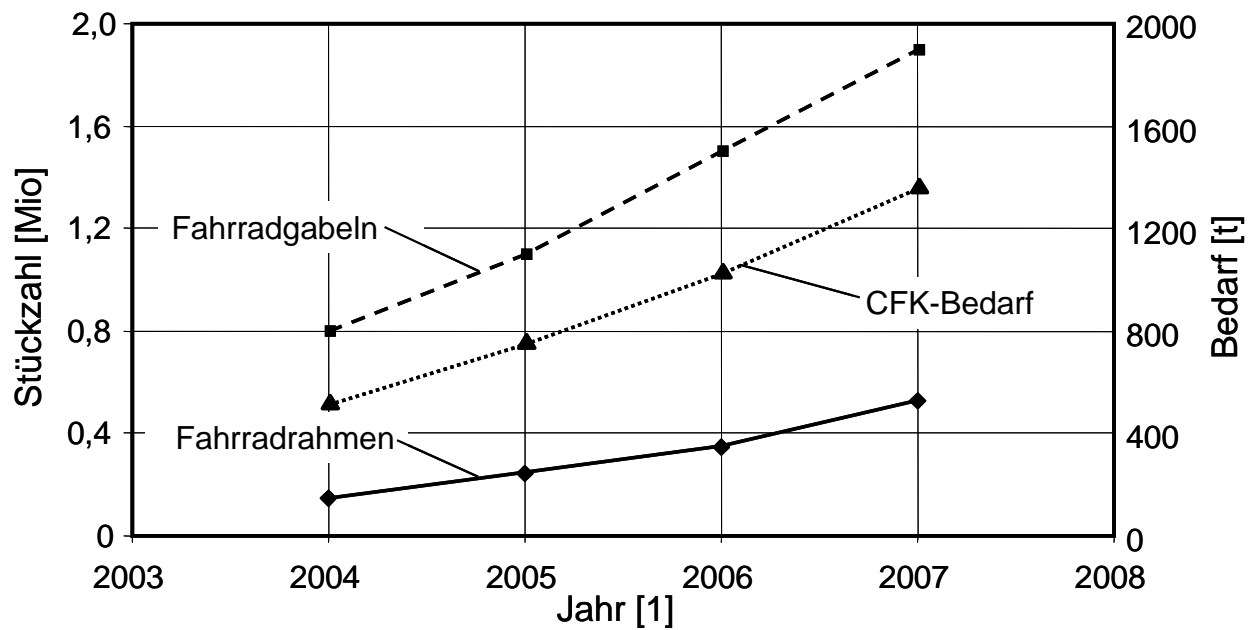


Bild 4: Geschätzte Produktion an CFK-Rahmen und -Gabeln sowie CFK-Bedarf über die Jahre 2004 – 2007

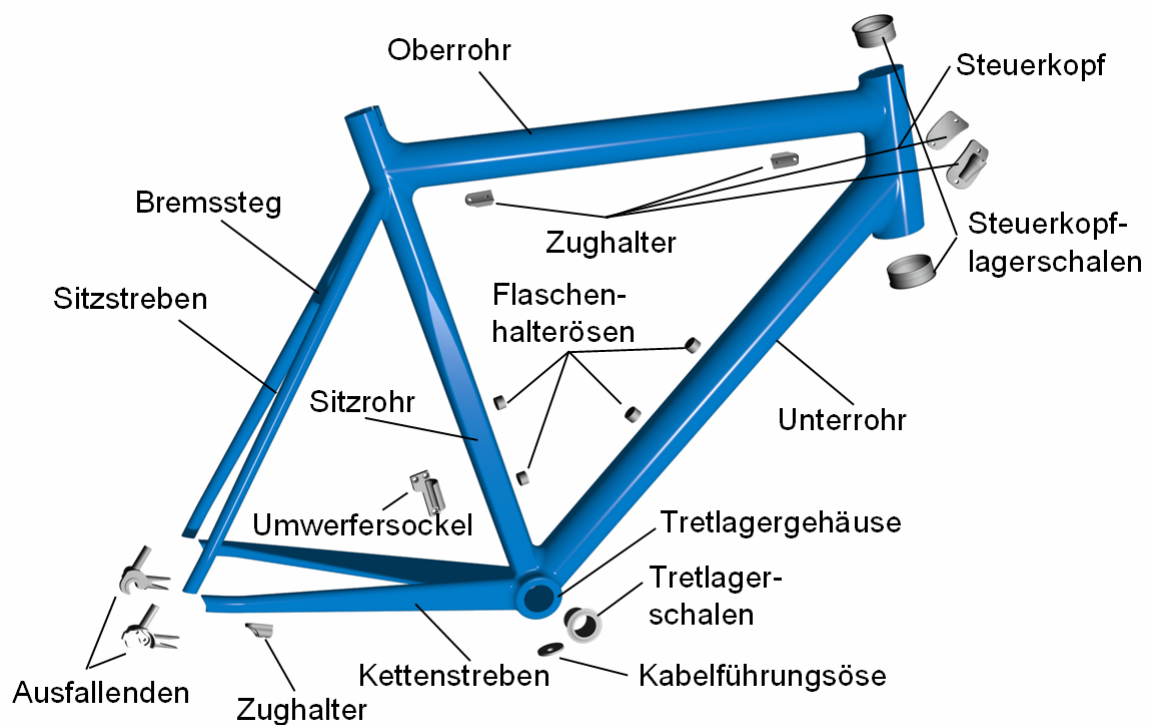


Bild 5: Bezeichnung der Rahmenteile eines Rennradrahmens in Diamantrahmen-geometrie

1.2 Zielsetzung

FKV, insbesondere bei Verwendung von hochfesten und hochsteifen Kohlenstofffasern als Verstärkungsphase, sind zukunftsweisende Werkstoffe zur Herstellung von Komponenten für Hochleistungs-Sportfahräder. Aufgrund der geringen Dichte, der einstellbaren mechanischen Eigenschaften sowie der Formgebungsmöglichkeiten etabliert sich der Werkstoff zunehmend im Fahrradrahmenbau und verdrängt vermehrt metallische Leichtbauwerkstoffe wie Titan oder Aluminium.

Durch eine werkstoff- und fertigungsgerechte Bauweise kombiniert mit einem hohen Grad an Werkstoffausnutzung, können FKV erfolgreich im Bau von Rahmen für Sportfahräder eingesetzt werden. Hierbei wird der Grundstein bereits in der Konstruktions- und Berechnungsphase gelegt, wo frühzeitig die Weichen für eine hohe Leistungs-Gewichts-Relation gestellt werden. Allerdings bestehen derzeit Unsicherheiten bei Konstrukteuren und Herstellern von FKV-Fahrradrahmen aufgrund mangelnder Fachinformationen, fehlenden Gestaltungsrichtlinien, unzureichenden oder nicht praxistauglichen Dimensionierungs- und Optimierungswerkzeugen und standardisierten Anforderungsprofilen, welche letztendlich zu unausgereiften und vermindert leistungsfähigen CFK-Bauteilen führen können.

Weiterhin müssen beim Umgang mit CFK die besonderen werkstoffspezifischen Belange, wie ein relativ sprödes Verhalten unter Stoßeinwirkung, berücksichtigt werden, damit die Alltagstauglichkeit des Rahmens gewährleistet werden kann.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zu einer verbesserten Anwendung von CFK im Hochleistungs-Rahmenbau liefern. Hierbei werden drei Ziele verfolgt.

Erstellung von Werkstoff- und Konstruktionsgrundlagen:

Nach einer Übersicht hinsichtlich der Anforderungen an Fahrradrahmen folgt eine Zusammenstellung über die Eigenschaften von metallischen und nichtmetallischen Rahmenwerkstoffen. Nach einem Vergleich der Werkstoffeigenschaften wird deren Tauglichkeit als Rahmenwerkstoff bewertet. Schließlich wird ein Überblick bestehende CFK-Bauweisenkonzepte, -Füge- und -Fertigungstechnologien gegeben und auf deren Vor- und Nachteile eingegangen.

Entwicklung von effizienten und praktikablen Dimensionierungs- und Optimierungswerkzeugen:

Zur Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit von Fahrradrahmen werden werkstoff- und fertigungsgerechte Werkzeuge zur Dimensionierung und Optimierung von Fahrradrahmen benötigt. Hierzu wurde ein Programm zur Optimierung der Gestalt und der Laminatkonfiguration von in Differentialbauweise gefertigte Rahmen entwickelt, das auf einem Gradientenverfahren beruht. Die Optimierung erfolgt an parametrischen Rahmengenometrie-FE-Modellen.

Zur Verbesserung der Festigkeitsvorhersage wurde ein Werkzeug zur vollständigen schichtenweisen Bruchanalyse entwickelt und in ein kommerzielles FE-Programm implementiert. Dieses beinhaltet drei Bausteine: a) Spannungsermittlung unter Berücksichtigung der werkstofflichen Nichtlinearitäten, b) physikalisch basierendes, differenzierendes Festigkeitskriterium und c) Steifigkeitsdegradationsmodell zur Beschreibung des Nachrissverhaltens nach unterkritischen Bruchmoden. Dieses Werkzeug erlaubt, gegenüber den Möglichkeiten, die derzeitige FE-Programme bieten, eine Vorhersage vom Erstschichtversagen bis zum Laminatversagen vorzunehmen und hierbei die werkstofflichen Nichtlinearitäten zu berücksichtigen.

Einfluss von lokaler, transversaler Stoßeinwirkung auf Fahrradrahmen:

Im alltäglichen Gebrauch können CFK-Rahmen durch lokale transversale Stoßeinwirkungen beansprucht werden. Bestehende fahrradspezifische Regelwerke geben keine Hinweise zur Versuchsdurchführung oder zur notwendigen Impaktbeständigkeit. Aus diesem Grund wurden Sturzversuche an RR durchgeführt, um maximal auftretende Impaktenergien zu ermitteln. Aufbauend auf den Erkenntnissen wird an repräsentativen Substrukturen das Schädigungsverhalten an Rohren aus Al und CFK unter verschiedenen Stoßenergien analysiert. Abschließend wird der Einfluss von Stoßeinwirkungen auf die Reststeifigkeit sowie Lebensdauer von Fahrradrahmen untersucht, um die Alltagstauglichkeit besser beurteilen zu können.

2 Anforderungen an Fahrradrahmen

Die Anforderungen an einen Fahrradrahmen sind sehr vielseitig und gehen weit über die rein funktionalen Anforderungen hinaus, die den Betrieb des Fahrrades erlauben. Bild 6 zeigt die Themengebiete, die innerhalb der Entwicklung eines Fahrradrahmens zu berücksichtigen sind. Zu den technischen Disziplinen zählen die Mechanik fester Körper, die Konstruktion, die Aerodynamik, die Physik und die Fahrwerkstechnik. Weiterhin gibt es Anforderungen, die durch die Individualität des Nutzers geprägt sind, wie die Themengebiete Ergonomie und Design. Schließlich schränken Reglementierungen, beispielsweise seitens der Radsportverbände, die Entwicklungsfreiheit ein. Soll ein RR-Rahmen im offiziellen Rennbetrieb eingesetzt werden, schreibt die UCI (Union Cycliste Internationale) die klassische Diamantrahmengenometrie (von engl. diamond = Raute) vor [11], wie sie in Bild 5 zu sehen ist. Außerdem werden Minimal- und Maximaldurchmesser der Einzelrohre vorgegeben, wodurch der Gestaltungsfreiraum erheblich eingeschränkt wird [11]. Ökonomische Randbedingungen sind sowohl in der Entwicklungsphase bezüglich der Entwicklungskosten als auch der Herstellkosten in der Serienfertigung zu berücksichtigen.

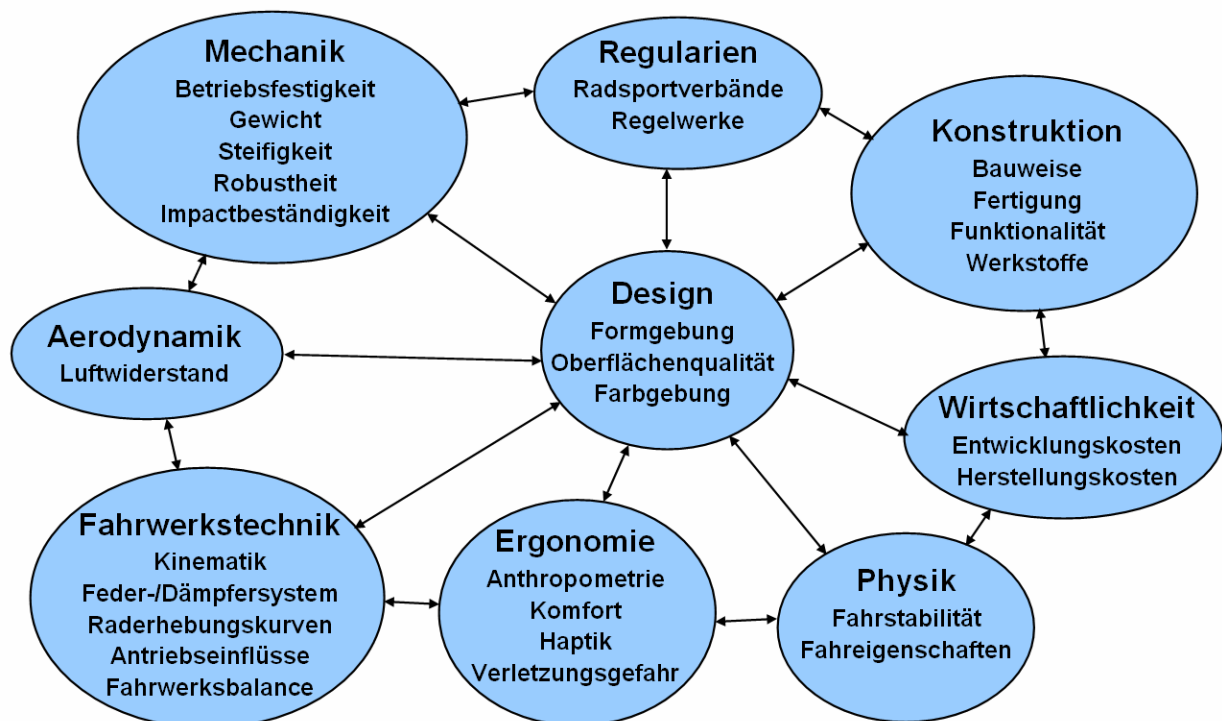


Bild 6: An der Entwicklung eines Fahrradrahmens beteiligte Disziplinen

Da sich Anforderungen oftmals gegenseitig beeinflussen, ist eine Priorisierung hinsichtlich des angestrebten Anwendungszwecks notwendig. Die Anforderungen sollten zu Beginn einer Entwicklung, beispielsweise in einem Lastenheft, definiert sein. Die Ausführungen innerhalb der Arbeit beschränken sich auf die mechanischen Anforderungen an Fahrradrahmen. Der Fahrradrahmen stellt das Bindeglied zwischen dem Fahrer und allen Komponenten dar und überträgt die Beanspruchungen aus dem Betrieb. Die allgemein anerkannten Regeln der Technik definieren sicherheitstechnische Anforderungen und zugehörige Prüfverfahren. Diese sind in Regelwerken wie der DIN 79100 [12] und der ISO 4210 [13] festgelegt. Eine Erweiterung, die DIN plus [14], basiert auf der DIN 79100 und formuliert erhöhte Anforderungen an Sportgeräte wie RR und MTB. Ende Juli 2006 wurden die nationalen Standards in Europa durch die im technischen Komitee TC333 im CEN erarbeiteten Sicherheitsnormen DIN EN 14766 [15] für MTB und DIN EN 14781 [16] für RR abgelöst. Diese werden allerdings heftig kritisiert, da die darin formulierten Anforderungen für nationale Verhältnisse teilweise als zu gering eingestuft werden, auch wenn sie in einigen Ländern Europas zu einer wesentlichen Verbesserung der Fahrradsicherheit beitragen werden. Daneben sind international zu nennen: die japanischen Normen JIS D 9203 [17] und JIS D 9301 [18] sowie die ASTM-Normen der Arbeitsgruppe F08.10, die derzeit an einem Vorschlag WK464 arbeiten, in dem neue Testmethoden für Fahrradrahmen entwickelt werden sollen [19].

Anzumerken ist, dass in den Normen nur Mindestanforderungen festgelegt sind und ein Bauteil damit nur den allgemein anerkannten Regeln der Technik genügt. Diese Regeln hinken dem Stand der Technik bzw. dem Stand der Wissenschaft, wie es das Produkthaftungsgesetz verlangt (ProdHaftG) [20], hinterher. Der Kunde hat das Recht, das ihm die Qualität geliefert wird, die er unter angemessener Berücksichtigung aller Umstände berechtigterweise erwarten konnte. Markenname, Preis, üblicher Gebrauch, Stand der Technik und Wissenschaft sowie Werbung setzen die Maßstäbe. Schließlich ist zu erwähnen, dass Fahrräder, die durch ihre Ausstattung nicht der Straßenverkehrszulassung (StVO) entsprechen, als Sportgeräte dem Geräteschutzgesetz (GSG) unterliegen [21].

Prüfungen an Fahrradrahmen können von unabhängigen Institutionen durchgeführt werden, welche meistens ein auf einer Norm basierendes Prüfprogramm zu Grunde legen, dieses allerdings auch oftmals durch eigene gesammelte Erfahrungen erweitert haben [22], [23], [24]. Zusätzlich werden Zertifikate vom TÜV sowie von der LGA

(GS-Zeichen) verliehen. Renommierte Hersteller verfolgen eigene Prüfprogramme, die sie aus langjähriger Erfahrung entwickelt und umgesetzt haben. Generell lässt sich aber feststellen, dass die Kommunikation unter den technisch verantwortlichen Personen in der Fahrradbranche wenig ausgeprägt ist.

Die Rahmenprüfungen können in statische, zyklische und dynamische Prüfungen unterteilt werden. Die Prüfbedingungen sollen die Beanspruchungen aus dem Fahrbetrieb möglichst gut widerspiegeln. Diese umfassen an Fahrradrahmen die normalen Betriebsbeanspruchungen wie Wiegetritt, Sattellast, Bremsen, Überrollen eines Hindernisses und Sprung sowie nahe liegende Fehlgebrauchslastfälle wie beispielsweise Frontalstoß, wheelie oder nose wheelie. Neben diesen Anforderungen an die Haltbarkeit werden Ansprüche an die Steifigkeit erhoben, die die Fahrsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit sicherstellen sowie Rückschlüsse auf die Fahreigenschaften zulassen.

Die Übergänge zwischen Betriebsbeanspruchungen, nahe liegendem Fehlgebrauch und Fehlgebrauch sind fließend und bis heute nicht eindeutig definiert. Dies ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Die Ermittlung von wirklichkeitsnahen Lastprofilen hat bis heute nicht ausreichend stattgefunden. Untersuchungen wurden in dieser Richtung zwar durchgeführt, [24] bis [29], konnten allerdings aufgrund der Komplexität der Fragestellung bis heute nicht umfassend und zufriedenstellend gelöst werden. Die Schwierigkeit bei der Festlegung von Lastprofilen liegt in der Definition der Prüfbedingungen (Fahrergewicht, Fahrhaltung, Fahrstil, Fahrstrecke), in der aufwändigen Messdatenerfassung (unterschiedlichste Beanspruchungen, Fahrradgestalt, Werkstoff), in der Vielzahl an unterschiedlichen Fahrradtypen und deren Einsatzbereichen sowie in der Aufbereitung und Bewertung der Messergebnisse. Weiterhin stellt sich bei diesen Hochleistungs-Sportgeräten die Frage nach der notwendigen Lebensdauer. Eine dauerfeste Konstruktion ist bei diesen Leichtbaustrukturen unangebracht. Während allerdings professionelle Radfahrer ihr Gefährt mehrmals im Jahr tauschen, verwendet der ambitionierte RR-Fahrer sein Gefährt möglicherweise über Jahrzehnte hinaus.

Im Gegensatz zu anderen Bereichen, wie der Luftfahrt oder dem Bauwesen, ist keine allgemein anerkannte Methodik zur Dimensionierung von Fahrradrahmen verfügbar, welche die Lastannahmen, die Vorgehensweise bei der Berechnung sowie ein dahinterstehendes Sicherheitskonzept beinhaltet. Daher entwickeln einige Hersteller ihre eigenen Konzepte, die sie ständig den Praxiserfahrungen anpassen.

Neben den durch Muskelkraft oder Fahrbahnunebenheiten eingebrachten Beanspruchungen gibt es Einwirkungen auf Fahrradrahmen, die in keinem Regelwerk angesprochen werden. Dies sind Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchte, Strahlung, Salz, Schmutz), Einfluss von transversalen Impaktbelastungen (Steinschlag, Stoßeinwirkung durch den Lenker- oder Brems-/Schalthebel), Sturz und schließlich Beanspruchungen aus Montage- und Demontagezuständen. Durch die Verwendung von CFK als Rahmenwerkstoff gewinnen diese als vernachlässigbar geglaubten Beanspruchungen enorm an Bedeutung. Die Hauptgründe sind die werkstoffspezifischen Eigenschaften, die sich von konventionellen metallischen Werkstoffen unterscheiden. Probleme treten hier einerseits durch mangelhafte Aufklärung oder Unwissen seitens der Hersteller oder der dazwischen geschalteten Fachhändler und andererseits beim Kunden durch fehlende Kenntnisse auf.

3 Werkstoffe im Fahrradrahmenbau

Der derzeit am häufigsten eingesetzte Rahmenwerkstoff für RR- und MTB-Rahmen ist Aluminium. Im oberen Preissegment wird, wie bereits erwähnt, CFK zunehmend attraktiver. Der Werkstoff Stahl hat weitestgehend noch traditionelle Bedeutung, während sich Titan als edler Werkstoff für Liebhaber entwickelt hat. Rahmen aus Magnesium sind aufgrund ihres vernachlässigbaren Marktinteresses nicht weiter von Bedeutung und werden somit nicht berücksichtigt.

3.1 Metallische Werkstoffe

Innerhalb des Kapitels wird eine Kurzübersicht über die verwendeten metallischen Werkstoffe im Rahmenbau gegeben. Um die Eigenschaften der Basismetalle besser nutzen zu können, werden Legierungselemente zugemischt. Die gängigsten sind Aluminium, Bor, Beryllium, Chrom, Kohlenstoff, Kupfer, Eisen, Mangan, Magnesium, Molybdän, Nickel, Silizium, Zinn, Titan, Vanadium, Wolfram, Zink und Zirkonium. Weiterführende Informationen über metallische Werkstoffe und Wirkungsweisen der Legierungselemente können in [30]–[34] eingesehen werden.

Stahl

Stahl gehört zu der Gruppe der Eisenwerkstoffe mit einem Kohlenstoffmassegehalt von kleiner 2 %. Die Eigenschaften hängen wesentlich vom Legierungsgehalt ab. Hier unterscheidet man unlegierte, niedriglegierte und hochlegierte Stähle [30]. Die Zuordnung hängt von den Grenzgehalten ab, welche in DIN EN 10020 [35] geregelt sind. Zu den wichtigsten Legierungselementen zählen Al, B, Cr, C, Cu, Mn, Mo, Ni, Si, Ti, V und W. Die Bezeichnung der Stähle kann nach der chemischen Zusammensetzung, dem Verwendungszweck, der Gütegruppe oder nach bestimmten chemischen oder physikalischen Eigenschaften erfolgen.

Bei dem für den Rahmenbau interessanten niedrig- und hochlegierten Stählen ist die Bezeichnung nach der chemischen Zusammensetzung gebräuchlich. Bei den niedriglegierten Stählen beginnt die Bezeichnung mit dem Hundertfachen des Kohlenstoffgehalts in %. Anschließend folgen die Legierungselemente entsprechend ihrem Gehalt im Werkstoff und einem Zahlenwert.

Tabelle 2: Umrechnungsfaktoren für die Legierungselemente niedriglegierter Stähle

Umrechnungsfaktor	Legierungselement
4	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W
10	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr
100	Ce, N, P, S
1000	B

Beispiel: 25 CrMo 4 (0,25 % Kohlenstoff; 1 % Chrom; geringer Anteil Molybdän)

Der angegebene Zahlenwert ist der durch einen spezifischen Faktor vervielfachte Gehalt im Werkstoff. Bei geringen Mengen wird auf die Angabe des Legierungsgehalts verzichtet.

Hochlegierte Stähle werden mit einem vorangestellten X gekennzeichnet. Anschließend erfolgen die Angabe des hundertfachen Kohlenstoffgehalts und der Legierungselemente mit abnehmendem Gehalt, wobei hier im Gegensatz zu den niedriglegierten Stählen keine Umrechnungsfaktoren verwendet werden. Beispiel: X50 CrMoV 15 (0,5 % Kohlenstoff, 15 % Chrom, geringer Anteil an Molybdän und Vanadium).

Die Entwicklung des modernen Fahrrades ist eng mit der Erfindung des Verfahrens zur Herstellung von nahtlosen Stahlrohren im Jahr 1885 verknüpft. Anfangs wurden noch einfache Baustähle mit relativ dicken Wandstärken verwendet. Später ist man mehr und mehr zu Qualitäten höherer Festigkeit mit immer geringeren Wandstärken übergegangen. Seit etwa dem Jahr 1950 wurden dann spezielle Legierungen verwendet, die zusätzlich wärmebehandelt waren. Überwiegend werden Chrom-Molybdän-Legierungen, welche umgangssprachlich als Chromoly bezeichnet werden, eingesetzt. Reynolds in England und Columbus in Italien waren Pioniere auf dem Gebiet der so genannten Vergütungsstähle für Fahrradrahmen. Geradezu sagenhaft ist der Ruf von Reynolds 531-Rohren, die über Jahrzehnte Maßstäbe gesetzt haben. Weitere bekannte Hersteller waren Ishiwata, Easton, Mannesmann, Oria, Tange, True Temper und Vitus, welche ebenfalls überwiegend Chrom-Molybdän-Legierungen für den Rahmenbau eingesetzt haben. Von den namhaften Marken vergangener Jahre produzieren nur noch wenige, unter anderem die beiden italienischen Hersteller Columbus und Dedacciai sowie der japanische Hersteller Tange.

Titan

Titan wird überwiegend aus den titanhaltigen Mineralien Rutil und Ilmenit gewonnen, da es dort als reines Titandioxid vorliegt. Zur Verbesserung der Eigenschaften werden Legierungselemente (Al, B, M, Mo, Sn, V, Zr, Zn) in Mengen zwischen 2 und 20 % beigefügt. Die Bezeichnung nach der chemischen Zusammensetzung erfolgt, wie bei allen Nichteisenmetallen, mit Angabe Ti für Titan, dem Legierungsbestandteil und dem Legierungsgehalt ohne Umrechnungsfaktor in absteigender Reihenfolge. In Fahrradrahmen werden überwiegend Rohre aus der Titanlegierung TiAl 4 V 6 (Titanlegierung mit 6 % Aluminium und 4 % Vanadium) eingesetzt.

Aluminium

Aluminium ist am Aufbau der Erdkruste mit etwa 8 % beteiligt und zählt somit zu den am häufigsten vorkommenden Gebrauchsmetallen. Im schmelzflüssigen Zustand werden dem Aluminium überwiegend die Legierungselemente Cu, Mg, Mn, Si, Fe, Ti, Be, Cr, Zn, Mo und Zr beigemischt, um entsprechende Eigenschaften zu erhöhen oder unerwünschte zu unterdrücken. Es wird zwischen Al-Knet- und -Gusslegierungen unterschieden. Von Interesse sind überwiegend die Knetlegierungen. Die Bezeichnung von Al-Legierungen entspricht der von Titan, beispielsweise steht AlMg 2 Mn 0,8 für eine Aluminiumlegierung mit 2 % Magnesium und 0,8 % Mangan. Im Bereich des Radsports hat sich bei Aluminium die Angabe der internationalen vierstelligen Werkstoffnummer gemäß der AA (Aluminium Association [36]) durchgesetzt. Diese unterscheidet acht Legierungsreihen, wovon die erste Ziffer das Hauptlegierungselement beschreibt. Überwiegend kommen die Legierungen 5083, 6011,

Tabelle 3: Legierungsreihen der Aluminium Association für Knetlegierungen

Legierungsreihe	Hauptlegierungselement
1xxx	Reinaluminium (> 99% Al)
2xxx	Kupfer
3xxx	Mangan
4xxx	Silizium
5xxx	Magnesium
6xxx	Magnesium-Silizium
7xxx	Zink-Magnesium
8xxx	Sonderlegierungen

6061, 6106, 7005, 7020 und 7075 zum Einsatz. Neben diesen gibt es noch weitere Sonderlegierungen, beispielsweise mit Scandium, das zur Gruppe der seltenen Elemente gehört. Bis in die 1990er Jahre galten dünnwandige Stahlrohre aus Chrom-Molybdän-Legierungen (CrMo) als idealer Werkstoff für den Rahmenbau. In den 1990er Jahren wurden Stahlrahmen jedoch innerhalb kurzer Zeit durch Aluminiumrahmen fast vollständig ersetzt.

3.2 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

CFK gehört zur Werkstoffklasse der FKV. Im Rahmenbau handelt es sich überwiegend um Endlosfaserverstärkungen, die in eine duroplastische Matrix eingebettet werden. Durch die Kombination von Fasern und Matrix ergeben sich Eigenschaften, die denen der Einzelkomponenten überlegen sind. Hierbei übernimmt jede Komponente eine bestimmte Funktion. Die Fasern übertragen überwiegend die Kräfte und sorgen für die notwendige Steifigkeit und Festigkeit der Verbundstruktur, während die Matrix die Kräfte in die Fasern einleitet und diese bei Druckbeanspruchung gegen Ausknicken stützt. Weiterhin schützt die Matrix die Fasern gegen äußere mechanische Einwirkungen und Umwelteinflüsse und bestimmt die Oberflächeneigenschaften [39]. Tiefere Informationen zu FKV können in [37]–[46] nachgelesen werden. Die gängigsten Verstärkungsfasern für Hochleistungs-Verbunde bestehen aus Glas und Kohlenstoff (anorganische Fasern) sowie aus Aramid (organische Faser). Nach der Faserherstellung werden sie mit einer Schlichte (Oberflächenschutz für die weitere Verarbeitung) und einem Haftvermittler (Verbesserung der Faser/Matrix-Haftung) überzogen. Die dünnen Elementarfasern von endloser Länge werden nicht einzeln, sondern multifil in Form von Rovings oder in Garnform geliefert, wobei ein Roving aus mehreren tausend Elementarfasern besteht. Die Anzahl der Elementarfasern innerhalb eines Rovings wird als K-Wert in Tausend angegeben. Häufig werden diese zu textilen Halbzeugen, wie Matten, Vliesen, Geweben, Gelegen, Gewirken, Geflechten weiterverarbeitet [38]. Insbesondere die Kohlenstofffaser stellt in Bezug auf eine hohe spezifischen Festigkeit und Steifigkeit sowie Ermüdungsfestigkeit, die herausragende Faser dar. Durch die faserparallele Orientierung der Graphitebenen besitzen die Kohlenstofffasern anisotrope (richtungsabhängige) Eigenschaften, die entsprechend ihrer Festigkeit und Steifigkeit klassifiziert werden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Eigenschaften verschiedener Kohlenstofffaserarten.

Tabelle 4: Charakteristische mechanische und physikalische Eigenschaften von Kohlenstofffasern

Faserart	ρ_f [g/cm ³]	R_f^t [MPa]	E_f^t [GPa]	$\varepsilon_{f,ult}^t$ [%]	α_T [-10 ⁻⁶ /K]
HT (high tenacity)	1,76 – 1,81	3.500 – 4.400	230 – 245	1,5 – 1,9	0,1 – 0,5
HS (high strength)	1,78 – 1,82	4.700 – 5.400	230 – 255	1,9 – 2,1	0,3 – 0,5
IM (intermediate modulus)	1,75 – 1,81	4.700 – 6.400	250 – 300	1,6 – 2,2	0,4 – 0,6
HM (high modulus)	1,75 – 1,88	3.100 – 4.900	340 – 500	0,9 – 1,4	0,5 – 1,0
UHM (ultra high modulus)	1,90 – 1,97	3.500 – 4.000	540 – 660	0,5 – 0,8	1,0 – 1,1

ρ_f : Dichte; R_f^t : Zugfestigkeit; E_f^t : Zugelastizitätsmodul
 $\varepsilon_{f,ult}^t$: Zugbruchdehnung; α_T : Temperatureausdehnungskoeffizient

Polymere Matrices können nach ihrer Molekülgestalt in Duroplaste (engmaschige Netzwerke), Thermoplaste (Kettenmoleküle) sowie in die in strukturellen FKV weniger eingesetzten Elastomere und thermoplastischen Elastomere (weitmaschige Netzwerke) eingeteilt werden [39]. Als Matrixsystem wird in hoch beanspruchten Bauteilen meist ein Duroplast eingesetzt. Diese wiederum lassen sich in Polymerisationsharze (ungesättigte Polyester- und Vinylesterharze), Polyadditionsharze (Epoxidharze) und Polykondensationsharze (Phenol-, Bismaleinimid-, Polyimidharze) einteilen [40], [47]. Tabelle 5 zeigt charakteristische Werkstoffkennwerte verschiedener Duroplaste. Unter den Duroplasten verfügen Epoxidharze (EP) aufgrund geringer Schwindungseigenschaften, sehr guter Haftung, guter Festigkeit und Schwingfestigkeit sowie Temperaturbeständigkeit über das beste Eigenschaftsspektrum. Eine Verbesserung der Zähigkeit der spröden Epoxidharze kann durch Zugabe von Kautschuk oder Thermoplastpartikeln erreicht werden [39].

Die Herstellung einer FKV Struktur basiert immer auf der verfahrenstechnischen Zusammenführung von als Verstärkung dienenden Fasern mit einem Polymer in eine vorgegebene Bauteilgestalt [38]. Hierbei wird zwischen direkten Herstellverfahren, die in einem Schritt aus Faser und Matrix die FKV Struktur erzeugen, und indirekten Herstellverfahren, die auf ein in einem Zwischenschritt hergestelltes imprägniertes Halbzeug zurückgreifen, unterschieden [38]. Zur Herstellung von Fahrradrahmen werden überwiegend imprägnierte Halbzeuge aus Endlosfasern und einer ungehärteten duroplastischen Kunststoffmatrix, so genannte Prepregs, engl. preimpregnated

Tabelle 5: Charakteristische mechanische und physikalische Werkstoffkennwerte verschiedener Duroplaste

	ρ_m [g/cm ³]	R_m^t [MPa]	E_m^t [GPa]	$\varepsilon_{m,ult}^t$ [%]	ζ_m [%]	a_m^T [10e ⁻⁶ /K]
Epoxidharz (EP)	1,2 – 1,4	35 – 100	3 – 8	2 – 10	2 – 5	40 – 100
U. Polyesterharz (UP)	1,2 – 1,8	40 – 70	4 – 6	2 – 5	7 – 12	70 – 200
Phenolharz (PF)	1,3	15 – 20	4 – 10	1 – 2	1 – 4	45 – 110
Vinylesterharz (VE)	1,1	50 – 85	3 – 8	5 – 7	3 – 7	-

ρ_m : Dichte; R_m^t : Zugfestigkeit; E_m^t : Zugmodul; $\varepsilon_{m,ult}^t$: Zugbruchdehnung;
 ζ_m : Härteschwindigkeit; a_m^T : Temperatureausdehnungskoeffizient

fibers, verwendet. Die verwendeten Faserarchitekturen zur Prepregherstellung für den Rahmenbau sind überwiegend UD-Gelege und Gewebe. Prepreg aus flächigen textilen Halbzeugen wird in der Regel bahnförmig auf Rollen gewickelt geliefert. Vorteile sind die niedrige Faserondulation, die geringe Schichtdicke und der hohe Faservolumengehalt. Die Herstellung des Prepregs erfolgt entweder mit der Schmelzharz- oder der Lösungsmittel-Methode. Durch Tiefkühlen bei unter -18°C wird verhindert, dass das Harz mit dem Härter reagiert und polymerisiert. Wird die Kühlkette unterbrochen oder überlagert, startet die Reaktion und das Prepreg wird unbrauchbar. Durch spezielle Reifeverfahren und Zuschlagstoffe wird die gewünschte Klebrigkeit (tack) eingestellt. Dadurch ist es möglich, Prepreg auch auf konvexe Formen zu schichten.

Berechnungsgrundlage eines mehrschichtigen, multidirektional verstärkten Laminats ist die UD-Einzelschicht. In Faserlängsrichtung sind die mechanischen Eigenschaften faserdominiert und weisen höchste Steifigkeits- und Festigkeitswerte auf, wohingegen quer zur Faserrichtung oder unter Schubbeanspruchung die Eigenschaften von der Matrix dominiert werden und wesentlich niedriger ausfallen. Werkstoffe, die eine Richtungsabhängigkeit aufweisen, besitzen ein anisotropes Werkstoffverhalten. Je nach feststellbaren Symmetrien um Achsen oder Ebenen können Sonderformen eintreten. Die UD-Einzelschicht besitzt ein transversal isotropes Werkstoffverhalten, da im faserparallelen Koordinatensystem eine Zentralsymmetrie bezüglich der Faserlängsrichtung vorliegt und der Werkstoff senkrecht zu den Fasern als quasi-isotrop angesehen werden kann [46].

Um mehrachsig auftretende Spannungszustände über die Fasern abtragen zu können, werden mehrere UD-verstärkte Einzelschichten, den Beanspruchungen entsprechend, zu einem Mehrschichtverbund (MSV) gestapelt. Die Steifigkeit und Festigkeit eines MSV hängt im Wesentlichen vom Fasertyp, dem Faservolumengehalt, der Faserwelligkeit und der Schichtenreihenfolge ab.

Die Kennzeichnung von FKV ist im Gegensatz zu Metallen in Regelwerken nicht eindeutig verankert. Im Allgemeinen gibt man mindestens die verwendeten Faser- und Matrixwerkstoffe, den Faservolumengehalt und die Stapelreihenfolge in eckigen Klammern an. Beispielsweise bedeutet $[-45/0_2/+45/90]_S$ die Faserorientierung und die jeweilige Anzahl der Einzelschichten (bei $n > 1$), der Index S steht für einen zur Mittelebene symmetrischen Schichtenaufbau [41].

3.3 Eigenschaften verschiedener Werkstoffe

Um einen Überblick über die spezifische Steifigkeit von Metallen und CFK-Werkstoffen zu geben, sind in Bild 7 charakteristische Eigenschaften von für den Rahmenbau gängigen Stahl-, Aluminium- und Titanlegierungen den entsprechenden Eigenschaften von CFK mit einem Faservolumengehalt (FVG) von 60 % gegenübergestellt. Bei den CFK-Werkstoffen wurden berücksichtigt: eine Standard- (HT), eine Intermediate-Modulus- (IM) sowie eine Hochmodulfaser (HM). Weiterhin wurden vier unterschiedliche Laminatkonfigurationen untersucht. Zu Vergleichszwecken wurde ein 0° -Laminat (L1) ausgewählt, welches beispielsweise in Zugstäben eingesetzt werden kann, und ein $\pm 45^\circ$ -Laminat (L2), das in einer rohrförmigen Struktur zur Übertragung von Torsion geeignet ist. Weiterhin ein Laminat mit drei Faserorientierungen (L3), wie es in Rohrstrukturen von Fahrradrahmen üblich ist, wobei die 0° -Schichten Normalkräfte und Biegemomente übertragen und die $\pm 45^\circ$ -Schichten Torsionsmomente aufnehmen können. Schließlich wird eine quasi-isotrope Laminatkonfiguration (L4) betrachtet, die bei mehrachsig beanspruchten Bauteilen zum Einsatz kommt.

Wie Bild 7 zeigt kann mit CFK durch die geringere Dichte im Vergleich zu den Metallen eine höhere spezifische Steifigkeit erreicht werden. Die Überlegenheit von CFK ist umso höher, je größer der Anisotropiegrad des Laminats ausgeführt werden kann. Deutlich ist der große Einfluss der Laminatkonfiguration auf die mechanischen Eigenschaften und das dadurch abdeckbare Eigenschaftsspektrum zu erkennen. Die Gefahr besteht, dass bei falscher Konfiguration des Laminats die spezifischen Steifigkeitskenngrößen auch schlechter als bei Metallen sein können.

Bild 8 zeigt charakteristische Festigkeitswerte. Bei den Metallen weisen Stahl und Titan die höchste Zugfestigkeit auf. Aluminium besitzt dagegen nur eine relativ niedrige Zugfestigkeit. Bei CFK ist der Einfluss der Verstärkungsfaser und der Laminatkonfiguration auf die Zugfestigkeit deutlich zu erkennen. Zwischen Laminatkonfiguration L1 und L2 kann der Unterschied in der Festigkeit beim Totalversagen bis zu einem Faktor 20 betragen. Weiterhin ist für eine Dimensionierung mit CFK in Abhängigkeit von der Beanspruchung und den Systemanforderungen zu entscheiden, ob gegen Erstsichtversagen (R_{FPF}) oder gegen Totalversagen (R_{LPF}) dimensioniert werden sollte. Bei einigen Laminatkonfigurationen ist R_{FPF} gleichbedeutend mit R_{LPF} , da nach dem Eintritt des Erstsichtversagens keine Kräfteumlagerung in

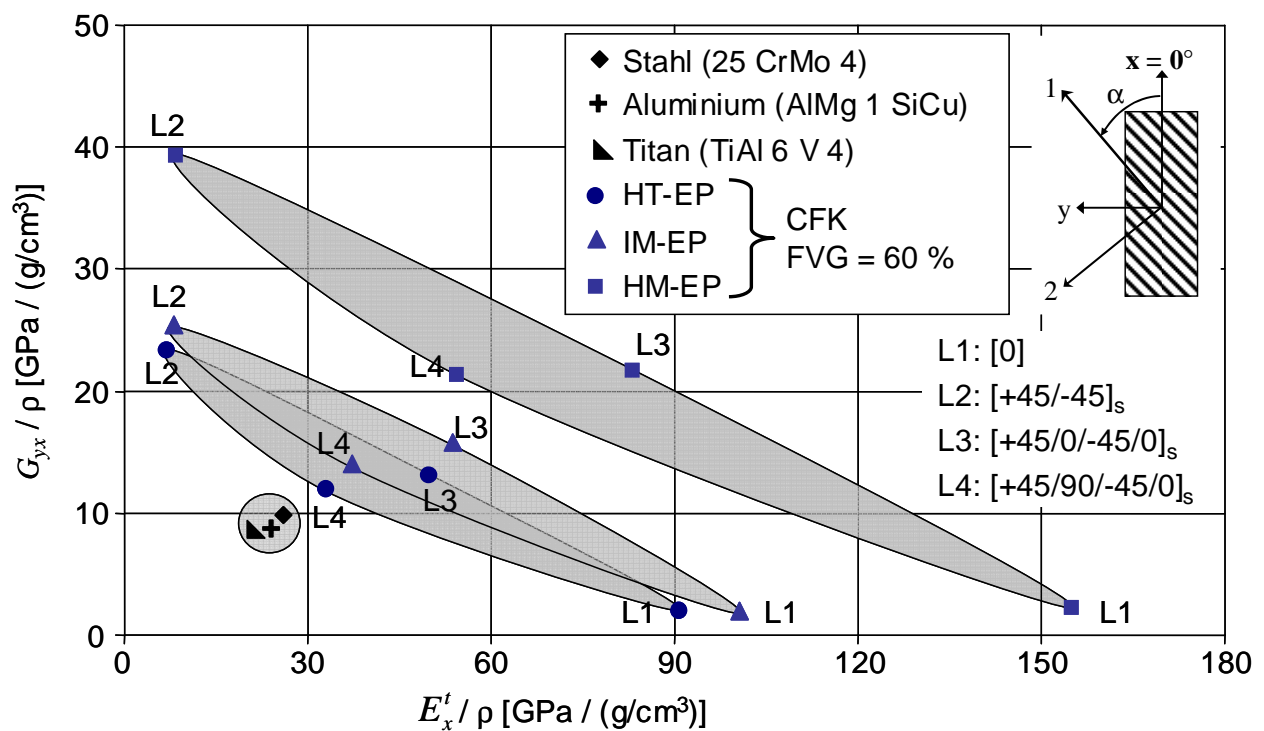


Bild 7: Spezifische Normal- und Schubmoduln E_x^t / ρ und G_{xy} / ρ von metallischen Werkstoffen und kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz mit unterschiedlichen Verstärkungfasertypen (HT-Standard-, IM-Intermediate-Modulus-, HM-Hochmodulkohlenstofffaser) und Laminatkonfigurationen mit einem Faservolumengehalt von 60%

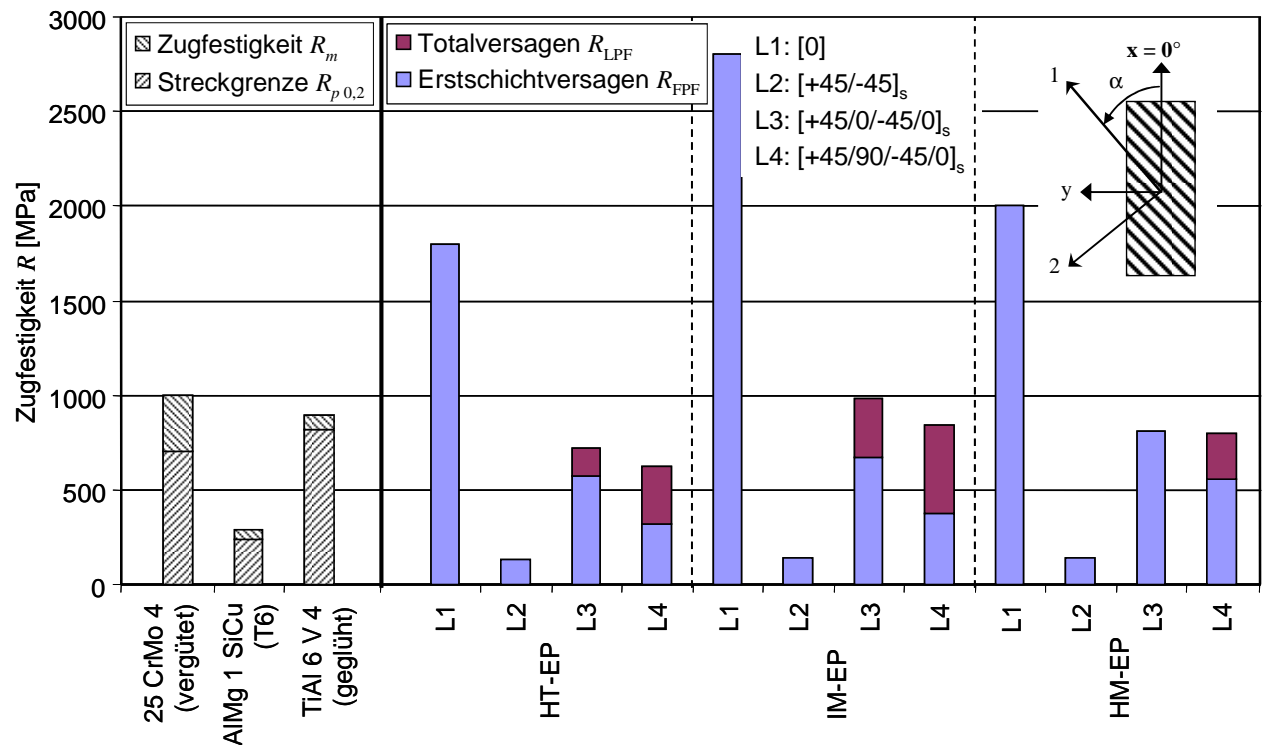


Bild 8: Festigkeit R_m und Streckgrenze $R_{p0,2}$ von metallischen Werkstoffen sowie Spannungen R_{LPF} und R_{FPF} , bei Total- bzw. Erstschichtversagen (bei Konfiguration L1 und L2 gleichbedeutend mit R_{LPF}) für verschiedene Faser/Matrix- und Laminatekonfigurationen (L1 – L4) unter einachsiger Zugbeanspruchung (HT-Standard-, IM-Intermediate-Modulus-, HM-Hochmodul-Kohlenstofffaser, Faservolumengehalt 60%)

Nachbarschichten möglich ist. Anzumerken bleibt, dass es bei Metallen üblich ist, die maximal ertragbare Spannung aus einachsialen Zugprüfungen anzugeben, da dies den maßgebenden Festigkeitskennwert darstellt. Bei FKV ist die Druckfestigkeit eines UD-Laminats in Faserrichtung in der Regel geringer als die Zugfestigkeit und kann innerhalb einer Strukturdimensionierung maßgebend sein.

Die Berechnung der Verbundeigenschaften der UD-Einzelschicht sowie der Kennwerte der Laminatekonfigurationen L1 – L4 erfolgt mit dem Programm LION (Laminate Evaluation) [48]. LION ist ein modular aufgebautes Berechnungswerkzeug, das aus den Bausteinen Mikromechanik, Spannungsermittlung, Anstrengungsbewertung und Steifigkeitsdegradation besteht. Dadurch ist es möglich auf der Grundlage der Kontinuumsmechanik und der klassischen Laminattheorie eine vollständige einzelschichtbasierte Festigkeitsanalyse durchzuführen. Der Rechenkern von LION ist als Visual-Basic®-Routine in Excel® implementiert, wodurch es möglich ist, die generellen

Funktionalitäten von Excel® zu nutzen. Hierbei können beispielsweise Ergebnisse grafisch oder tabellarisch aufbereitet, Werkstoffkenngrößen in Tabellen für die FE-Simulation abgelegt und Schalenschnittgrößen in eigenen Datenblättern berechnet werden.

Tabelle 6 zeigt eine Bewertung der Vor- und Nachteile der vorgestellten Werkstoffe hinsichtlich ihrer Eignung als Rahmenwerkstoff, in diesem Fall für Hochleistungs-Rennradrahmen. Hierbei ist besonders ein geringes Gewicht bei hoher Steifigkeit und ausreichender Festigkeit entscheidend. Demgegenüber sind wirtschaftliche Interessen und Anforderungen an die Alltagstauglichkeit sowie Langlebigkeit im professionell betriebenen Radsport von geringerem Interesse. Je nach Fahrradtyp, geplantem Einsatzbereich und wirtschaftlichen sowie fertigungstechnischen Interessen können die einzelnen Bewertungsmerkmale h_i durch Faktoren g_i hinsichtlich ihrer Relevanz unterschiedlich gewichtet werden. Der gewichtete Mittelwert μ_{MW} wird mit Hilfe Gl. 3.1 berechnet. Den höchsten gewichteten Mittelwert μ_{MW} in dieser Wertung erreicht CFK, gefolgt von Aluminium und Titan.

$$\mu_{MW} = \frac{\sum_i h_i \cdot g_i}{\sum_i g_i} \quad (3.1)$$

Tabelle 6: Bewertung von Rahmenwerkstoffen für die Anwendung in Hochleistungs-Rennradrahmen

Bewertungsmerkmal B_i	Stahl (25 CrMo 4)			Titan (TiAl 6 V 4)		Aluminium (AlMg 1 SiCu)		CFK (IM600- EP)	
	g_i	h_i	$h_i \cdot g_i$	h_i	$h_i \cdot g_i$	h_i	$h_i \cdot g_i$	h_i	$h_i \cdot g_i$
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
Dichte	10	1	10	2	20	4	40	5	50
Steifigkeit	7	5	35	4	28	3	21	4	28
Festigkeit	4	5	20	4	16	3	12	5	20
Ermüdungsfestigkeit	3	4	12	3	9	2	6	5	15
Zähigkeit	2	5	10	4	8	3	6	2	4
Werkstoffdämpfung	1	2	2	2	2	2	2	5	5
Kerbempfindlichkeit	2	5	10	4	8	3	6	4	8
Temperaturbeständigkeit	1	5	5	5	5	5	5	3	3
Fügbareit	4	4	16	3	12	3	12	2	8
Formgebungseigenschaften	8	2	16	3	24	4	32	5	40
Spanende Bearbeitbarkeit	2	4	8	3	6	5	10	2	4
Lackierbarkeit	4	3	12	4	16	4	16	2	8
Korrosion	5	1	5	5	25	3	15	5	25
Schadenstoleranz	3	5	15	4	12	4	12	2	6
Reparaturmöglichkeit	1	5	5	4	4	4	4	2	2
Wiederverwertbarkeit	1	4	4	4	4	4	4	1	1
Werkstoffkosten	1	5	5	1	1	4	4	1	1
Verarbeitungskosten	3	3	9	2	6	3	9	1	3
Alterung	1	5	5	5	5	4	4	2	2
			$\mu_{MW} = 3,24$		$\mu_{MW} = 3,35$		$\mu_{MW} = 3,49$		$\mu_{MW} = 3,70$
Bewertungsmerkmal h_i von 1 – 5: 1 geringe Eignung, 5 hohe Eignung									
Gewichtungsfaktor g_i von 1 – 10: 1 geringe Wichtung, 10 hohe Wichtung									

4 FKV-Bauweisen im Fahrradrahmenbau

Bis 1880 waren bei Niederrädern so genannte Kreuzrahmen üblich, die im Wesentlichen aus einer Strebe von der Vordergabel zur Hinterachse und einer zweiten, vom Sattel zum Tretlager, bestanden. Um 1880 wurde der Diamantrahmen (vgl. Bild 5) entwickelt, der den Kreuzrahmen letztendlich vom Markt verdrängte. Mit dem Einsatz von FKV wurden auch futuristisch anmutende Formgebungen möglich. Pionierarbeit leistete im Jahre 1960 Benjamin Bowden mit dem „Spacelander“, dem ersten Fahrrad mit einem Rahmen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) [49]. Das Gesamtgewicht des in Bild 9, links, dargestellten Fahrrads betrug etwa 23 kg. Aufgrund der geringen Nachfrage, hervorgerufen durch die hohen Herstellkosten und das Aufsehen erregende Design, wurden lediglich 500 Stück gefertigt.

Bild 9, rechts, zeigt einen CFK-Rahmen der Firma Trek (Y-Foil), der in den Jahren 1998/1999 produziert wurde [50]. Die Produktion wurde durch den bereits erwähnten Beschluss der UCI über die Verwendung der Diamantrahmengenometrie im Jahr 2000 eingestellt. Derart gestaltete Rahmensysteme sollen aufgrund der Nachgiebigkeit des Auslegers den Komfort erhöhen und werden noch gerne im Triathlonbereich verwendet, der nicht den UCI-Reglementierungen unterworfen ist. Die Herstellung erfolgte, indem zwei handlamierte Halbschalen miteinander verklebt wurden.



Bild 9: Spacelander von Benjamin Bowden mit Rahmen aus glasfaserverstärktem Kunststoff aus dem Jahr 1960 ([49], links), Y Foil von Trek mit Rahmen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff und Ausleger zur Erhöhung des Fahrkomforts 1998 ([50], rechts)

4.1 Klassifizierung von Bauweisen

Der Begriff der Bauweise bezeichnet die Art des Bauens. Die Möglichkeiten der Klassifizierung von Bauweisen kann nach werkstoffübergreifenden Entwurfs- und Konstruktionsrichtlinien, nach den mechanisch-konstruktiven Eigenschaften eines Bauteils oder nach Vorgaben hinsichtlich Montage- und Demontageeigenschaften erfolgen [51]. Im allgemeinen Leichtbau ist die Klassifizierung in

- Differentialbauweise
- Integralbauweise
- integrierende Bauweise
- Verbundbauweise

üblich [52]. Diese lässt sich ebenfalls auf den Fahrradrahmenbau übertragen, wobei in den nachfolgenden Betrachtungen die CFK-Struktur verstanden wird.

Das Hauptmerkmal der Differentialbauweise besteht darin, ein Bauteil aus mehreren einfach zu fertigenden Komponenten über geeignete Verbindungsverfahren miteinander zu fügen. Das Hauptmerkmal der Integralbauweise erkennt man daran, dass ein Bauteil mehrere Funktionen beinhaltet, aus einem Stück besteht (Prinzip der Einstückigkeit) und relativ komplexe Formen annehmen kann. Bild 10 zeigt jeweils ein Beispiel für einen Rahmen in Integralbauweise und in Differentialbauweise, Tabelle 7 stellt jeweils deren Vor- und Nachteile dar. Eine Zwischenstufe stellt die



Bild 10: CFK-Rahmen Carbon Sports Total Eclipse in Integralbauweise [53], links, und CFK-Einzelstrukturen des Canyon Carbon Ultimate F10 in Differentialbauweise [54], rechts

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Differential- und Integralbauweise im Rahmenbau

Differentialbauweise	Integralbauweise
Vorteile	
<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilität durch die Verwendung von Einzelstrukturen - bessere Anpassung der Faserorientierung an den Krafftfluss in geometrisch einfacheren Strukturen - geringere Werkzeugkosten bei mehreren Rahmengrößen - einfachere Handhabung kleinerer Werkzeuge - erhöhte Übersichtlichkeit in der Fertigung von Einzelstrukturen durch geringere Teileanzahl - Ausgleich von Maßungenauigkeiten - zusätzlicher Schritt in der Qualitätssicherung nach Herstellung der Einzelstrukturen möglich - geringe Ausschussquote 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Fügebereiche - Möglichkeit der Anpassung der Wanddicke und Faserverläufe an die Beanspruchungen über die Gesamtstruktur - Formgebungsmöglichkeiten - geringere Anzahl an Prozessschritten - höhere Stückzahlen - gute Oberflächenqualität über die Gesamtstruktur - Möglichkeit des „Carbon-look“ über Gesamtstruktur
Nachteile	
<ul style="list-style-type: none"> - Einschränkung bei der Formgebung - Spannungskonzentration an den Fügestellen durch Steifigkeitssprünge, Eigenspannungen und Kerben - Gewichtserhöhung durch Fügungen - erhöhte Anzahl an Prozessschritten und Vorrichtungen - erhöhter Aufwand zur Qualitätssicherung der Fügungen - verminderte Oberflächenqualität in den Fügebereichen - hoher Nachbearbeitungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkung bezüglich Bauteilabmessungen - hohe Anforderungen an die Fertigung aufgrund der Komplexität des Bauteils - Komplexität durch große Teileanzahl zur Herstellung des Vorformlings - höhere Kosten für notwendige mehrteilige Werkzeuge bei mehreren Rahmengrößen - hoher Änderungsaufwand bei Designmodifikationen - irreparabler Verzug beim Entformen - erhöhte Ausschussquote

integrierende Bauweise dar, die die Vorzüge der Integral- und Differentialbauweise zu nutzen versucht und dem Prinzip folgt, dass die Gesamtstruktur in „so viele Einzelstrukturen wie nötig, aber so wenig wie möglich“ aufgeteilt wird. Demgegenüber beschreibt die Verbundbauweise, dass mehrere unterschiedliche Werkstoffe unlös-

bar zu einem Bauteil miteinander verbunden werden, wie dies beispielsweise bei Sandwichstrukturen der Fall ist.

4.2 Klebeverbindungen für Rahmen in Differentialbauweise

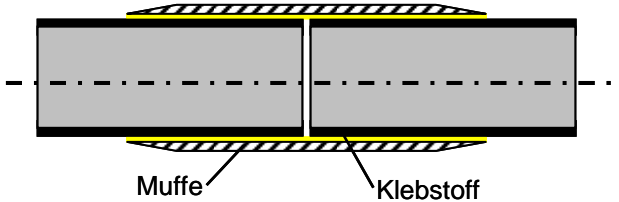
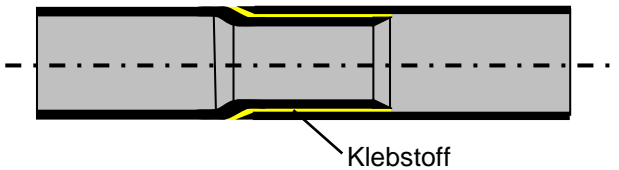
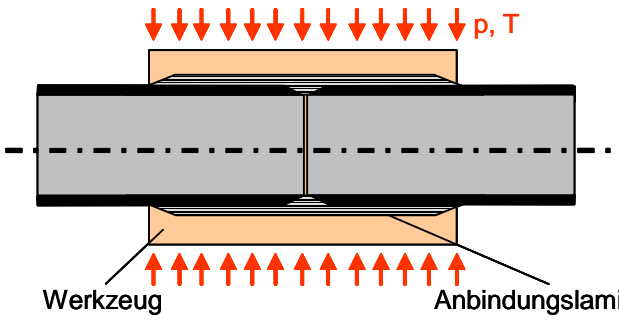
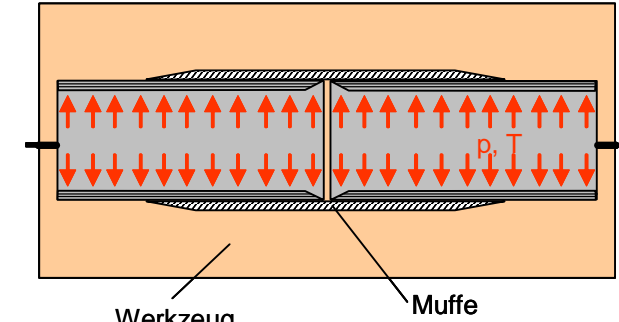
Besteht ein Rahmen aus mehreren Einzelstrukturen, müssen diese zu einem Rahmen gefügt werden, wobei diese Verbindungen nicht lösbar ausgeführt werden. Bei FKV-Bauteilen aus duroplastischer Matrix sind die Verbindungsmöglichkeiten stark eingeschränkt. Nieten bzw. Kleben oder eine Kombination beider Verfahren sind die am häufigsten angewendeten Verbindungstechniken. Im Fahrradrahmenbau ist insbesondere die stoffschlüssige Verbindung der Bauteile durch Kleben weit verbreitet. Die maßgeblichen Gründe für den Einsatz von Klebeverbindungen und deren Eigenschaften sind [39], [41]:

- besondere Eignung zur Verbindung von dünnwandigen Bauteilen
- minimales Mehrgewicht durch das Fügemitel
- niedrige Spannungen in der Klebung (allerdings relativ große Fügeflächen notwendig)
- geringere Kerbwirkung und keine Schwächung der zu verbindenden Bauteile durch Bohrungen
- Fügung unterschiedlicher Werkstoffe möglich
- geringe thermische Eigenspannungen bei gleichen Fügepartnern
- Ausgleich von geringen Toleranzen in den Passungen durch den Klebstoff
- Umsetzung optisch unscheinbar

Im Rahmenbau kommen verschiedene Arten von Klebeverbindungen zum Einsatz, die in Tabelle 8 schematisch dargestellt sind.

Vorsicht ist beim Kontakt von Metallen, insbesondere Aluminium, mit Kohlenstofffasern geboten. Sobald eine elektrisch leitende Umgebung vorhanden ist, kommt es zwischen Elementen mit unterschiedlichem elektrochemischen Spannungspotenzial, die in direkter Verbindung zueinander stehen, zu galvanischer Korrosion. Besonders die Kohlenstofffaser weist gegenüber Aluminium ein starkes Potenzialgefälle auf, wodurch Aluminium korrodiert, so dass gegebenenfalls geeignete Maßnahmen getroffen werden, um die Kohlenstofffaser vom Metall zu isolieren. Dies kann sowohl durch eine homogene trennende Klebeschicht als auch durch eine Trennschicht, beispielsweise aus GFK, erfolgen.

Tabelle 8: Schematische Darstellung häufig verwendeter Klebeverbindungen zur Fügung von Rohren zu Fahrradrahmen

A	 <p>Muffe Klebstoff</p>	<p>Verklebung von zwei Rohren durch eine Metall- oder FKV-Muffe</p>
B	 <p>Klebstoff</p>	<p>direkte Verklebung von zwei Rohren</p>
C	 <p>Werkzeug Anbindungs laminat p, T</p>	<p>Verklebung von zwei Rohren durch nachträglich auf die Fügestelle aufgebrachte Anbindungs laminat (Tube-to-Tube-Technik)</p>
D	 <p>Werkzeug Muffe p, T</p>	<p>Verklebung einer metallischen oder FKV Muffe gemeinsam mit dem Aushärten des Vorformlings (Co-cure-Technik)</p>

4.2.1 Muffenverbindungen

Eine einfache Art der Verbindung von Rohren ist die Verwendung von vorgefertigten Muffen, wie in Tabelle 8 A und D dargestellt, die bereits beim Bau von dünnwandigen Stahlrahmen verwendet wurde. Durch Muffen ließen sich die zu verbindenden Rohre leichter löten. Unter Verwendung von Silberlot wurde die Festigkeit in den Knoten-

punkten, im Gegensatz zu einer Schweißverbindung, durch die geringere Temperatur und Einbrenngefahr nicht verringert [55].

Schön gestaltete Muffen tragen weiterhin zu einer optischen Aufwertung des Rahmens bei. Die Fertigung der Hauptrohre gestaltet sich bei dieser Bauweise sehr einfach, und das äußere Erscheinungsbild des Rahmens weist eine gute Oberflächenqualität auf. Allerdings ist die Fertigung der Muffen aufgrund der komplexen Form sowohl unter Verwendung von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen sehr aufwändig. Um die verschiedenen Rahmengrößen mit den jeweils unterschiedlichen Rohrabgängen realisieren zu können, sind eine Vielzahl unterschiedlicher Muffen notwendig. Eine hohe Maßhaltigkeit in der Fertigung ist erforderlich, da sich die Rohre innerhalb der Muffe in ihrer Winkelstellung nur unwesentlich korrigieren lassen. Aus mechanischer Sicht ist es sinnvoll, die Muffe aus dem gleichen Werkstoff zu fertigen wie die anschließenden Bauteile, um Korrosion und Zwangsbeanspruchungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungs- und Querkoeffizienten der Werkstoffe zu vermeiden. Zusätzlich tragen die Muffen entscheidend zum Gesamtgewicht des Rahmens bei.

Bild 11, links, zeigt eine aus Aluminium gefertigte Steuerkopfmuffe des Scalpel-Rahmens von Cannondale, in die Ober- und Unterrohr angebunden sind [56]. Im rechten Teilbild ist ein komplex geformter Sitzrohrknotenpunkt aus Aluminium des SLT-Rahmens von BMC mit eingeklebtem Oberrohr, Sitzrohr und Monostay Sitzstrebe dargestellt. Derart filigrane Bauteile lassen sich in Aluminium als CNC- oder als Gesenkschmiedebauteile sehr einfach umsetzen.

Bild 12 zeigt Beispiele von CFK-Muffen. Im linken Bild ist der Sitzrohrknoten des 585-Rahmens von Look dargestellt, im rechten Bild eine Muffe im Tretlagerbereich des VRXS-Rahmens von Time. CFK-Muffen werden in der Regel aufwändig aus Prepreg-Halbzeugen im Schlauchblasverfahren oder aus trockenen Halbzeugen mittels Flüssigimprägnierverfahren hergestellt. Diese Bauteile benötigen eine intensive Nachbearbeitung, um eine nachfolgende Verklebung zu ermöglichen. Insbesondere die Oberflächen der Anschlussstücke erfordern eine hohe Maßhaltigkeit, um eine gleichbleibende Klebeschichtdicke zu gewährleisten. Zur Erreichung des „carbon-look“ ist ein präzises Arbeiten notwendig, um eine makellose Deckschicht, meist aus Gewebe mit kleiner Filamentanzahl (1K, 3K) zu erzielen.



Bild 11: Metallische Muffenbauweise: Scalpel Cannondale Steuerkopf (links) und BMC SLC Sitzrohrknotenpunkts (rechts)



Bild 12: CFK Muffenbauweise: Look 585 Sitzrohrknoten (links) und Time VXRS Tretlagerbereich (rechts)

Eine Möglichkeit der Verbindung der CFK-Rohre mit der Muffe besteht darin, die ausgehärteten Rohre in einer Positioniervorrichtung mit der Muffe zu verkleben (vgl. Tabelle 8 A), wobei in der Regel alle Rahmenrohre in einem Schritt mit den Muffen und den Ausfallenden zum Gesamtrahmen verklebt werden. Hierbei werden

überwiegend chemisch reagierende, wärmehärtende Klebstoffe auf Epoxidharzbasis verwendet. Zur Erreichung einer hochwertigen Klebeverbindung ist eine sorgfältige Oberflächenvorbereitung durch Reinigen, Entfetten und Aufräumen notwendig. Weiterhin bestimmen eine gleichmäßige Klebeschichtdicke sowie eine vollflächige Verklebung maßgeblich die Qualität der Fügung.

Wie in Tabelle 8 D dargestellt, kann die Muffe auch mit den nicht ausgehärteten Rohrlaminaten aus Prepreg im Werkzeug platziert werden. Anschließend werden das zweiteilige Außenwerkzeug geschlossen und temperiert und die im Innern befindlichen Aufblasschläuche mit Druck beaufschlagt, so dass die Gelege an das Werkzeug sowie an die Innenflächen der Muffe gepresst werden. Bei dieser Methode ist eine gleichmäßige, vollflächige Verklebung mit geringer Klebeschichtdicke erreichbar. Probleme bei der Verwendung von Muffen zeigen sich oftmals am Übergang der Muffe zum Rohrquerschnitt, da durch den nicht vermeidlichen Steifigkeitssprung zwischen Muffe und Rohr es zur Rissbildung in der Klebung kommen kann. Hier sollten möglichst „weiche“ Übergänge, beispielsweise durch Abstufung oder Schärfung, geschaffen werden.

4.2.2 Verklebung

Tabelle 8 B zeigt eine direkte Verklebung zweier Rohre. Um keine Unstetigkeit in der Oberfläche zu erhalten, bedient man sich mit einer Kröpfung eines Rohrendes. Auch hier sind die Oberflächen in den Fügebereichen entsprechend vorzubehandeln. Die Bearbeitung der Fügebereiche ist sehr aufwändig, damit die Passmaße erhalten und eine vollflächige Klebung sichergestellt werden kann. Bei den einschnittigen Überlappungen kann es durch Schälspannungen zu Rissen an den hoch belasteten Enden der Klebung kommen. Bild 13 zeigt die Verklebung von zwei Rohren.

4.2.3 Tube-to-tube-Verbindung

Eine Verbindung zweier Rohre kann ebenfalls durch nachträglich aufgebrachte Anbindungslamine über die Fügestelle erreicht werden. Diese einfache Methode wird beispielsweise im Apparatebau zur Verbindung von Rohren oder von Stützen an Behältern verwendet. Während dort die Anbindung und Konsolidierung durch Handlaminierten erfolgt, kann das Konsolidieren auch automatisiert durchgeführt werden, beispielsweise durch die Autoklavtechnik, durch einen Vakuumsack oder durch

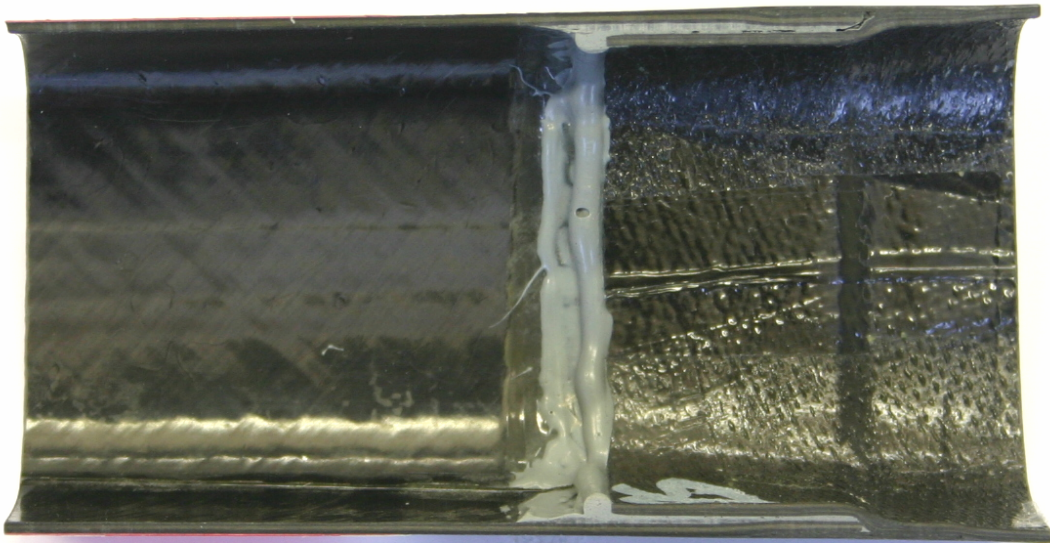


Bild 13: Verklebung von zwei Rohren

Knotenwerkzeuge, die zwischen Werkzeug und Fügung über einen Expansionswerkstoff verfügen, der unter Temperatur Druck auf die Anbindungslamine aufbringt. Die Anbindungslamine werden, den Beanspruchungen entsprechend, in Coupon- oder Schlaufenform auf die Rohraußenseiten im Bereich der Fügestellen aufgebracht. Bild 14, links, zeigt einen Schnitt durch den Steuerkopfknoten mit den über Anbindungslamine gefügten Ober-, Steuer- und Unterrohrenden. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass mit minimalem Aufwand an CFK-Prepregs die Rohre miteinander gefügt werden können. Die Anbindungslamine müssen sehr präzise auf die Fügestelle aufgebracht werden. Deutlich wird im Vergleich zur Monocoquebauweise, Bild 14, rechte Abbildung, dass durch die Fügung einzelner Rohre eine Verrippung im Steuerkopfbereich entsteht. Nachteilig wirkt sich die schlechte Oberflächenqualität im Bereich der Fügezonen aus. Hier ist eine kosmetische Nachbearbeitung notwendig, die ebenfalls mit einem nicht unerheblichen Mehrgewicht verbunden ist.

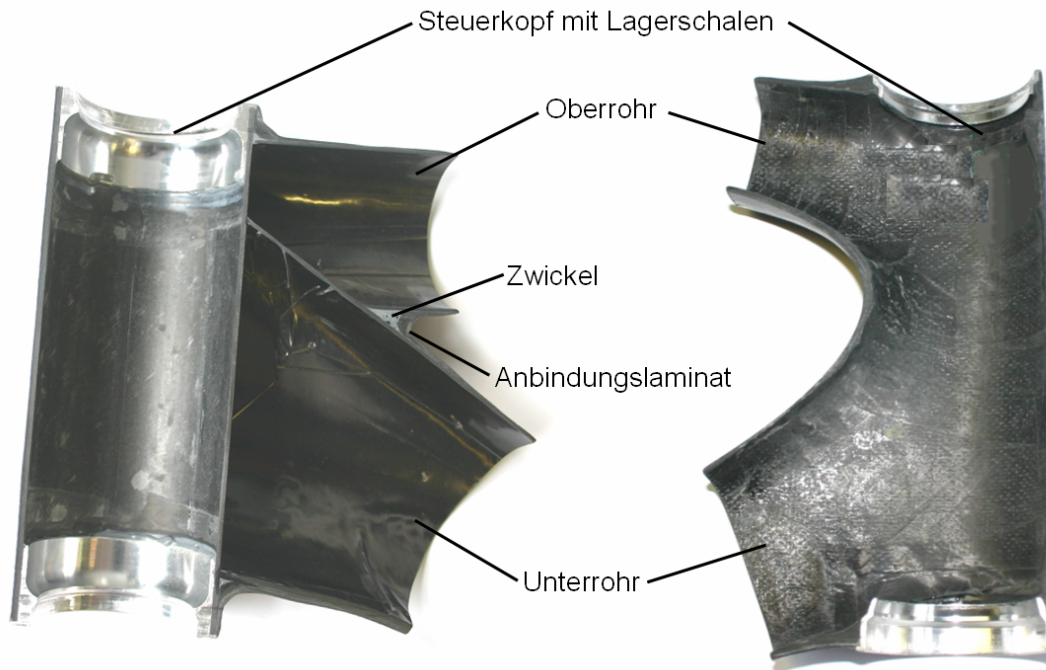


Bild 14: a) Schnitt durch den Steuerkopf eines mit Direktlaminaten gefügten MTB-Rahmens und b) Schnitt durch den Steuerkopf eines Monocoque-Rennradrahmens

4.3 Fertigungsverfahren

Die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens im Rahmenbau wird im Wesentlichen durch Anforderungen an die mechanische Leistungsfähigkeit, die Oberflächenqualität, die Formkomplexität, die Bauteilgröße, die Herstellkosten und die Stückzahl entschieden. Durch die hohen Anforderungen an die Steifigkeit und Festigkeit eines Rahmens bei möglichst geringem Gewicht kommen vorzugsweise Verfahren zum Einsatz, die Endlosfasern verarbeiten und Laminatgütern mit einem möglichst hohen Faservolumengehalt erreichen. Schließlich sollte eine Faserondulation aufgrund der Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften in der Laminatenebene möglichst gering gehalten werden [57]. Nachfolgend wird eine kurze Übersicht über Verfahren gegeben, die im Rahmenbau zur Anwendung kommen. Einige konnten sich jedoch nicht etablieren.

4.3.1 Handlaminieren

Das Handlaminieren ist das älteste und einfachste Verfahren zur Herstellung von FKV-Bauteilen [44]. Bei diesem Verfahren genügen minimale technische Voraussetzungen, weshalb es hauptsächlich für kleinere bis mittlere Serien angewandt wurde.

Meistens wird eine Negativform des herzustellenden Bauteils angefertigt, worin abwechselnd das Faserhalbzeug und die flüssige Matrix eingebracht werden. Hierbei ist auf eine gute Durchtränkung des Faserhalbzeugs zu achten. Anschließend härtet das Bauteil, je nach verwendetem Matrixsystem, in der Luft oder dem Härteofen aus. Die Aushärtung erfolgt in der Regel drucklos, was geringere Faservolumengehalte und Lufteinschlüsse zur Folge hat. Durch Fertigung und Fügung zweier Halbschalen konnten mit diesem Verfahren Fahrradrahmen hergestellt werden. Nachteilig an diesem Verfahren sind die schlechteren mechanischen Eigenschaften, das hohe Maß an Handarbeit und die Fügenaht in der Rahmenmittelebene. Das Verfahren, Rahmen durch Handlamine herzustellen, wurde zu Beginn des Einsatzes von CFK im Rahmenbau häufiger angewendet. Aufgrund der erwähnten begrenzten Leistungsfähigkeit und Reproduzierbarkeit findet man im Handlaminieren hergestellte Fahrradrahmen heute überwiegend im Bereich enthusiastischer Privatpersonen.

4.3.2 Schlauchaufblasverfahren

Das Schlauchaufblasverfahren hat sich bei der Herstellung von FKV-Fahrradrahmen durchgesetzt. Hierbei werden duroplastische Prepregs geformt und im Werkzeug positioniert. Im Inneren befindet sich ein Schlauch, der nach dem Schließen des Werkzeugs mit Innendruck beaufschlagt wird, die Wärmezufuhr erfolgt in der Regel durch Heißpressen. Dadurch legt sich das Laminat an die Wandung des Werkzeugs an und erhält damit seine äußere Form. Anschließend wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil herausgenommen. Bei diesem Verfahren werden heutzutage ausschließlich Duroplaste verwendet. Lediglich GT unternahm Mitte der neunziger Jahre mit dem gefederten MTB-Modell STS den Versuch, den Hauptrahmen aus einem FKV mit thermoplastischer Matrix zu fertigen. Allerdings war dieser Rahmen sehr schwer und konnte sich nicht am Markt behaupten, sodass die Produktion eingestellt wurde.

Vorteile des Verfahrens liegen in der Flexibilität der Formgebung, der Variabilität in der nachträglichen Wanddickengestaltung, da nur die Außenseite durch die Werkzeugoberfläche definiert ist, in den hohen mechanischen Eigenschaften des Prepregs und in der sehr guten Oberflächenqualität auf der dem Werkzeug zugewandten Seite. Weiterhin lassen sich damit Lasteinleitungselemente (Inserts) integrieren. Die Auswahl an Prepreghalbzeugen ist sehr vielseitig und ermöglicht eine

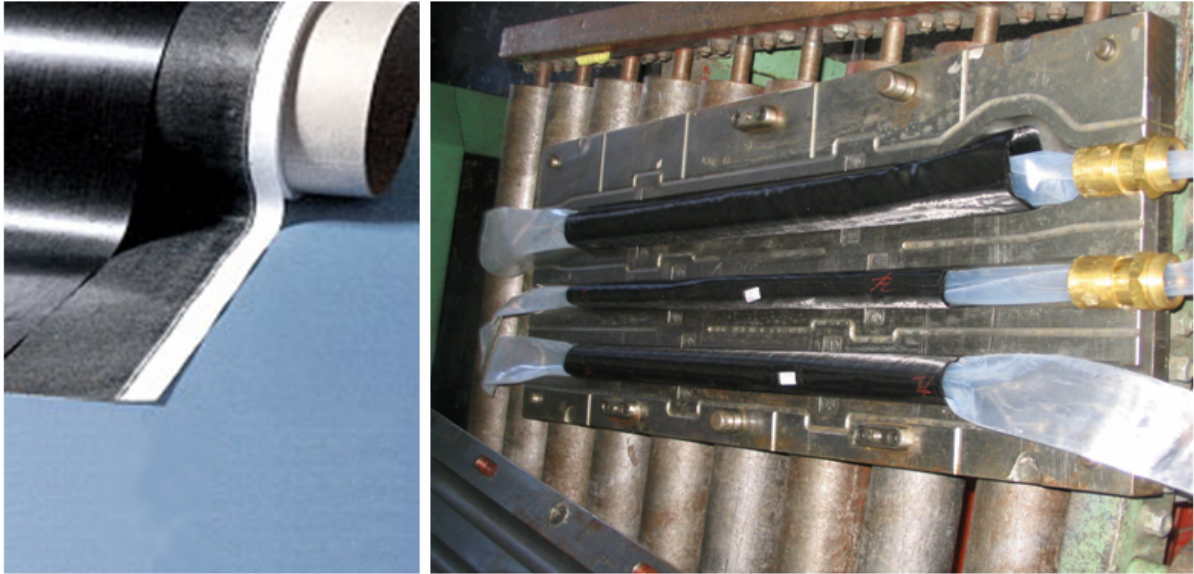


Bild 15: Duroplastische Prepregrolle mit Kohlenstofffasern und im Werkzeug positionierte Rohrvorformlinge zur Verarbeitung im Schlauchaufblasverfahren

hohe Variabilität in der Gestaltung der Laminatkonfigurationen. Mit diesem Verfahren lassen sich sowohl Einzelstrukturen als auch komplette Fahrradrahmen herstellen. Nachteilig beim Schlauchaufblasverfahren ist die Gefahr der Faltenbildung und des Verrutschens von Prepregzuschnitten durch das Aufblasen des Schlauchs sowie von Lufteinschlüssen.

4.3.3 Sonstige Verfahren

Die Wickeltechnik ist ein Verfahren zur Herstellung von überwiegend rotationssymmetrischen Körpern, wie beispielsweise von Rohren. Beim Duroplastwickeln werden die mit Harz vorimprägnierten Fasern auf einen Wickeldorn abgelegt, anschließend erfolgt die Aushärtung des Harzes. Soll der Dorn wieder entfernt werden, sind die Formgebungsmöglichkeiten stark eingeschränkt, da dieser auf einer Seite herausgezogen werden muss. Weiterhin sind Faserorientierungen parallel zur Rohrlängsachse nur aufwändig beispielsweise mittels an den Enden umlaufend äquidistant angeordneten Stiften möglich, die bei der Änderung der Ablegerichtung von den Rovings umschlungen werden, um Halt auf dem Dorn zu finden. Die Oberflächenqualität ist befriedigend. Vorteile der Wickeltechnik sind die hohe Reproduzierbarkeit und die sehr guten mechanischen Eigenschaften. Mit der Wickeltechnik können auch thermoplastische Matrices verarbeitet werden.

Flüssigimprägnierverfahren konnten sich im Rahmenbau bis heute nicht durchsetzen. Zu Beginn des Fertigungsprozesses wird ein trockenes textiles Halbzeug in eine Kavität eingelegt und von der Umgebung durch eine Folie (Vakuuminjektion) oder durch ein Werkzeug (Überdruckinjektion) von der Umgebung abgeschlossen. Anschließend wird das Textil durch Harz aus dem Injektionsschlauch in der Kavität getränkt. Durch dieses Verfahren lassen sich hochwertige, reproduzierbare Bauteile mit sehr guter Oberflächenqualität herstellen, weiterhin können auch hier Lasteinleitungselemente integriert werden. Nachteilig sind die mechanischen Eigenschaften, die im Vergleich zu Bauteilen, die im Wickel- oder im Schlauchblasverfahren hergestellt werden, geringer ausfallen. Dies ist in dem etwas geringeren Faservolumengehalt und der höheren Faserondulation des textilen Halbzeugs, das durch Stabilisierungsfäden oder Vernähung gehalten werden muss, begründet. Weiterhin ist das Verfahren für flächige Bauteile besser geeignet als für Hohlkörper, da der Hohlkörper beispielsweise durch einen Kern oder eine Blase gefüllt werden muss. Der Kern kann aus einem Schaumwerkstoff hergestellt werden, der im Bauteil verbleibt oder der im Nachhinein herausgelöst oder herausgeschmolzen wird.

Bild 16 zeigt einen ehemals von Villiger vertriebenen MTB-Rahmen mit Blattfedern (Arrow Spyce). CFK-Hauptrahmen und GFK-Blattfedern werden in einem Schuss im RTM-Verfahren hergestellt [59], [60].

Flächige, konsolidierte und imprägnierte Halbzeuge mit thermoplastischem Matrixmaterial können umgeformt werden [38]. Hierbei werden so genannte endlosfaserverstärkte Organobleche auf Schmelztemperatur erwärmt und mittels Stempelumformung zu einer dreidimensionalen Struktur ausgeformt, die im letzten Arbeitsschritt besäumt werden müssen. Der Prozess ist weitestgehend automatisierbar, die Taktzeiten bei diesem Verfahren sind sehr kurz, wodurch hohe Stückzahlen erreicht werden. In Bild 17 ist das K2 ProFlex und das Cannondale Raven dargestellt. Dieser Ende der neunziger Jahre entwickelte Rahmen hatte jeweils einen gefederten MTB-Rahmen, der aus zwei miteinander gefügten Halbschalen aus CFK mit Thermoplastmatrix (TowFlex® der Fa. Hexcel) gefertigt wurden. Nachteilig bei dem Verfahren sind die Formbeschränkung durch den Umformgrad, die Fügung in der Rahmenmittelebene, die beschränkte Auswahl und Konfigurationsmöglichkeiten bei den Halbzeugen sowie die Tatsache, dass die Änderung der Wanddicke nur durch eine Änderung der Werkzeugkavität erreicht werden kann. Dieses Verfahren für CFK-Rahmen konnte sich daher ebenfalls nicht durchsetzen.



Bild 16: Rahmen von Villiger (Arrow Spyce) mit GFK-Blattfeder und Schaumkern, hergestellt im RTM-Verfahren [60]



Bild 17: Rahmen des K2 ProFlex und des Cannondale Raven aus zwei thermisch umgeformten Halbschalen [61]

5 Dimensionierung von Schalenstrukturen aus endlosfaser- verstärktem Kunststoff

5.1 Annahmen bei der Laminatbetrachtung

Zur Dimensionierung von Bauteilen ist die Überführung der Struktur und Ihrer Werkstoffeigenschaften in ein Ingenieursrechenmodell notwendig, das durch analytische oder numerische Verfahren gelöst werden kann. Für den anwendungsnahen Einsatzbereich sollte die Beschreibung der Werkstoffeigenschaften durch einfach zu ermittelnde Kenngrößen, jedoch mit der Forderung nach einer hinreichend genauen Vorhersagequalität erfolgen. Bei FKV gestaltet sich dies im Vergleich zu isotropen und homogenen Werkstoffen schwieriger. Die wesentlichen Gründe sind die Vielzahl unterschiedlichen Faser/Matrix-Konfigurationen, die Vielfalt möglicher Faserarchitekturen und das komplexe Schädigungsverhalten.

Die Beschreibung eines FKV-Laminats kann in verschiedenen Dimensionen erfolgen. Diese beinhaltet die Faser/Matrix-Ebene, die Einzelschichtebene und die Laminat-ebene. Ansätze zur Strukturdimensionierung auf der Faser/Matrix-Ebene sind ungeeignet, da sie aufgrund der Unterschiede in den Größenordnungen von Einzelfaser und Gesamtstruktur zu einer unbeherrschbaren Modellgröße führen. Weiterhin erfordert diese Vorgehensweise die Kenntnis der Faser/Matrix-Anordnung, die sowohl durch Streuungen in den Halbzeugen als auch durch Unwägbarkeiten im Herstellprozess nicht vorhersagbar ist [39].

Im Gegensatz dazu können auf der Laminatenebene die interessierenden Schädigungsformen von FKV, also Zwischenfaserbruch, Faserbruch sowie Delamination, nur unzureichend beschrieben werden. Unter Zwischenfaserbruch ist die Rissbildung in der Matrix (Kohäsivbruch) oder in der Faser/Matrix-Grenzfläche (Adhäsivbruch) parallel, unter Faserbruch die Trennung der Fasern senkrecht zur Faserlängsrichtung zu verstehen. Delamination bezeichnet das Lösen zweier benachbarter Schichten innerhalb eines Laminats [62].

Wie in Kapitel 3.2 bereits aufgeführt, hat sich daher die Betrachtung der UD-Einzelschicht als geeignete Berechnungsgrundlage herausgestellt. Hierbei werden Faser und Matrix nicht im mikromechanischen Sinne getrennt betrachtet, sondern zu einem Kontinuum mit transversal isotropen Eigenschaften homogenisiert. Unter einem Laminat wird in dieser Modellvorstellung ein Mehrschichtverbund aus überein-

andergeschichteten UD-Einzelschichten mit im Allgemeinen unterschiedlicher Faserorientierung verstanden.

Bei Leichtbaustrukturen aus FKV handelt es sich überwiegend um dünnwandige, leicht gekrümmte Flächenstrukturen, deren Spannungskomponenten in Dickenrichtung vernachlässigbar klein sind. In diesem Sonderfall spricht man von einem ebenen Spannungszustand und kann eine Reduzierung des räumlichen Elastizitätsgesetzes vornehmen [46]. Daraus folgt eine Abstrahierung des Bauteils auf die Modellvorstellung der Schalenstruktur.

Zur Lösung von strukturmechanischen Problemstellungen hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Schlüsseltechnologie entwickelt. Sie hilft in der Entwicklung Kosten und Zeit zu sparen, indem frühzeitig Schwachstellen aufgedeckt und beseitigt und Einsparpotenziale ermittelt werden können. Bei Fahrradrahmen sind es überwiegend Anforderungen an die Steifigkeit und Festigkeit, die untersucht werden müssen.

5.2 Optimierung mit parametrischen Geometrie-FE-Modellen

Die Steifigkeitseigenschaften eines Fahrradrahmens tragen wesentlich zum Fahrverhalten bei. Radsportmagazine greifen gerne auf Steifigkeitswerte zurück, um dadurch Rahmen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zu quantifizieren und schließlich auch zu klassifizieren. Hierbei ist die Torsionssteifigkeit um die Rahmenlängsachse eine wichtige Anforderung. Sie gilt als Maß für die Spurhaltung des Vorderrades zum Hinterrad und trägt maßgeblich zur Fahrstabilität bei. Weiterhin soll das berüchtigte „Lenkerflattern“, eine Pendelschwingung des Hauptrahmens im Resonanzbereich, das durch Unwuchten, beispielsweise am Laufrad, ausgelöst wird, durch eine entsprechend hohe Steifigkeit im normalen Fahrbetrieb vermieden werden.

Der Wiegetritt stellt den dominierenden Lastfall beim Fahren dar, bei dem der Fahrer das Fahrrad leicht neigt und stehend auf die zur Rahmenebene exzentrisch angeordneten Pedale tritt. Korrespondierend zu dieser Beanspruchung wird die laterale Verformung des Tretlagers ermittelt, die als Maß für die Güte der Energieumsetzung gilt. Schließlich soll möglichst wenig Energie durch elastische Verformung des Rahmens verloren gehen.

Die Messung und Angabe dieser beiden Steifigkeitswerte können nach unterschiedlichen Methoden erfolgen ([25], [23], [24], [63], [64], [65], [66]).

Die Steifigkeitsanforderungen beeinflussen im Wesentlichen die globale Rahmengestalt, wohingegen Festigkeitsproblemstellungen eher lokaler Natur sind und durch lokale Verstärkung oder lokale Gestaltänderung gelöst werden können. Das Erreichen der Steifigkeitsanforderungen soll bei möglichst geringem Gewicht umgesetzt werden, was einerseits eine optimale Strukturgestalt und andererseits bei FKV zusätzlich die Festlegung einer beanspruchungsgerechten Laminatkonfiguration erfordert. Um dies zu erreichen, bietet sich eine programmgesteuerte Strukturoptimierung an, welche „quasi auf Knopfdruck“ zu einer verbesserten Struktur unter Erfüllung der Anforderungen (Zielfunktion) führt.

Zur Gestaltoptimierung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, die je nach Aufgabenstellung mehr oder weniger gute Lösungen hervorbringen. Voraussetzung für das Gelingen einer Optimierung ist ein möglichst wirklichkeitsnahes Strukturmodell, das insbesondere das Antwortverhalten hinsichtlich der definierten Zielfunktion genügend genau abbildet [67]. Grundsätzlich lassen sich derzeit auf dem Markt befindliche Gestaltoptimierungsprogramme in parameterfreie und parametrische Verfahren unterscheiden [68].

Die parameterfreie Gestaltoptimierung kann durch Topologie- oder Formoptimierung vorgenommen werden [69]. Bei der Topologieoptimierung wird innerhalb eines zur Verfügung stehenden, mit Werkstoff gefüllten Designraums unter Vorgabe von Belastung und Randbedingungen eine optimale Materialverteilung berechnet [67]. Beispielhaft sei hier die Soft-Kill-Option-(SKO-)-Methode genannt [70], [71]. Demgegenüber wird bei der Formoptimierung die Strukturoberfläche in einem selektierten Bereich verändert. Dies geschieht in der Regel an FE-Modellen durch Shape-Basis-Vektoren oder unter Zuhilfenahme von MorphingVerfahren [72]. Ein Beispiel für eine Formoptimierungsstrategie ist die Computer-Aided-Optimization-(CAO-)-Methode [71]. Die Formoptimierung stellt ein besonders produktives Hilfsmittel zur Detailverbesserung dar, wenn bereits eine klar definierte Grundform vorliegt und nur geringe Variationsmöglichkeiten gegeben sind [71].

Für isotrope Werkstoffe ist die Anwendung von parameterfreien Verfahren weit verbreitet. Schwieriger gestaltet sich die Optimierung von FKV, da im Gegensatz zu den isotropen Werkstoffen durch die Anisotropie eine Vielzahl von weiteren freien Designparametern berücksichtigt werden muss. Eine Möglichkeit bietet die CAIO-(Computer-Aided-Internal-Optimization-) Methode [71], eine Erweiterung der CAO-Methode, bei der angestrebt wird, die Fasern entlang der Hauptspannungen anzu-

ordnen. Einen Überblick über Verfahren zur parameterfreien Gestaltoptimierung kann [72] entnommen werden. Ein Nachteil der Topologieoptimierung von FKV-Strukturen ist die Schwierigkeit der fertigungstechnischen Umsetzung, da das Optimierungsergebnis meist sehr komplexe Formen und Faserverläufe aufweist, die mit gängigen Fertigungsverfahren und unter Verwendung erhältlicher Halbzeuge nicht möglich sind. Weiterhin liegt der Optimierung gewöhnlich ein FE-Modell zu Grunde, innerhalb dessen oftmals Probleme durch Spannungssingularitäten oder durch die Netzfeinheit auf. Insbesondere Morphing-Verfahren sind in der Formänderung beschränkt, da die daraus resultierenden finiten Elemente sonst irreguläre Formen annehmen.

Bei einer parametrischen Optimierung werden Designparameter an einem Geometrie- oder FE-Modell festgelegt und in zulässigen Bereichen verändert, wobei als Designparameter hierbei alle am Modell beteiligten Größen, wie Radien, Abstände, Wanddicken Durchmesser, Werkstoffeigenschaften verwendet werden können. Nachteilig ist, dass der Raum der möglichen Lösung aufgrund der beschränkten Anzahl an Designparametern stark eingeschränkt ist. Die gefundene Lösung kann im Vergleich zur möglichen Lösung im vollständigen Lösungsraum suboptimale Eigenschaften aufweisen [72]. Oftmals findet die Gestaltänderung in einem CAD-System mit einer automatisch nachgeschalteten FE-Berechnung statt, in der Praxis stehen dieser Vorgehensweise aber nicht selten Schnittstellenprobleme entgegen. Für das Auffinden von lokalen oder globalen Extremwerten einer Funktion mit mehreren unbekanntem Designparametern können iterative Suchfunktionen eingesetzt werden ([73] - [75]).

Soll im Schlauchaufblasverfahren aus UD-Prepreg in Differentialbauweise gefertigter RR-Rahmen hinsichtlich eines Steifigkeitswertes optimiert werden, gibt es eine Reihe von Randbedingungen, die zwingend eingehalten werden müssen. Diese stammen überwiegend aus den Regelwerken der UCI sowie aus werkstofflichen und fertigungstechnischen Anforderungen:

1. Verwendung einer UCI-konformen Rahmengeometrie (Diamantrahmen) [11]
2. Verwendung von geschlossenen Hohlquerschnitten und Einhaltung von vorgeschriebenen Minimal- und Maximalquerschnitten für jedes Rohr [11]
3. Berücksichtigung von baulichen Zwangspunkten, wie Reifen- und Kettenfreiheit, Verwendung von standardisierten Steuerlagern und Sattelstützen sowie Tretlagern sowie vorgegebene Befestigungen für Bremsen, Flaschenhalter, Zugführungen und Umwerfer

4. Einzelfertigung einfach geformter Rohre in Überlänge und Kürzung entsprechend der Rahmengröße (Differentialbauweise)
5. Gewährleistung eines hohen Maßes an Abwickelbarkeit der Rohroberflächen zur Vermeidung von Überlappungen in den Einzelstrukturen bei der Verwendung größtmöglicher Zuschnitte und zur Verringerung der Gefahr der Faltenbildung
6. Einhaltung gewisser Mindestwanddicken in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers, um fertigungstechnische und haptische Anforderungen an die Steifigkeit zu erfüllen
7. Verbesserung der haptischen Eigenschaften durch Vermeidung von ebenen Flächen oder Flächen mit sehr großen Radien aufgrund geringer Biegesteifigkeit
8. Hauptbeanspruchungen in einem Rohr sind die Balkenschnittgrößen Normalkraft N_x , Biegemomente M_y und M_z und Torsionsmoment M_x

Das Ergebnis der Optimierung sollte ein Rahmen sein, der aus einzelnen Rohren mit optimierten Querschnitten sowie einer optimierten Laminatkonfiguration aufgebaut ist, das als Ausgangsstruktur für die Konstruktion des Rahmens dient. Hierbei sollte eine Zielfunktion, wie etwa eine höchstmögliche Steifigkeit C bei vorgegebenem Gewicht m oder umgekehrt, definiert werden können. Für diesen Zweck wurde ein Optimierungswerkzeug entwickelt, das den genannten Anforderungen gerecht wird und das in zwei in Reihe geschaltete Algorithmen aufgeteilt ist:

- Optimierung der Strukturgestalt (OpTop)
- Optimierung der Laminatkonfiguration (OpLam)

5.2.1 Optimierung der Strukturgestalt

Aus der im vorherigen Abschnitt angegebenen Anforderungsliste bietet sich die Verwendung eines parametrischen Verfahrens an. Die wesentlichen Gründe hierfür sind die restriktiv vorgeschriebene Rahmengeometrie und die Forderung nach Rohrquerschnitten in einem eng begrenzten Gestaltungsfreiraum. Um Schnittstellenprobleme zwischen CAD und FE-Umgebung zu umgehen, wurden die parametrischen Geometriemodelle innerhalb der FE-Umgebung aufgebaut. Diese besitzen geringere Formgebungsmöglichkeiten im Vergleich zu den CAD-Programmen, aber die Strukturgestalt der in Differentialbauweise gefertigten Rahmen soll aus Gründen der Fertigung ohnehin einfach gehalten werden.

Als Grundelement kann ein einzelnes Rohr mit einem elliptischen oder kreisförmigen Anfangs- und Endquerschnitt angesehen werden. Jedes Rohr i ist somit über vier Designparameter $Var_{i,j}$, $j = 1$ bis 4, definiert, die jeweils die Haupt- und Nebenscheitel der Querschnitte am Rohranfang und am Rohrende kennzeichnen, so dass die Oberfläche des Rohrs abwickelbar bleibt. Weiterhin gilt, dass eine Querschnittsänderung gegenüber einer Wanddickenänderung bei gleichem Gewichtszuwachs zu einem höheren Steifigkeitszuwachs führt. Die Wanddicke eines Rohres resultiert aus Anforderungen an die Fertigung, Haptik und Stabilität. Sinnvoll ist deshalb die Festlegung der Wanddicke jeden Rohres, gekennzeichnet durch $Var_{i,WD}$, in Abhängigkeit von der Rohrgeometrie. Dies kann weiter vereinfacht werden, indem die Wanddicke in Abhängigkeit des maximalen Scheiteldurchmessers durch eine Funktion

$$Var_{i,WD} = f(\max Var_{i,j}) \quad \text{wobei } j = 1, 4 \quad (5.1)$$

beschrieben wird. Die Anzahl k der Designparameter $Var_{i,j}$ ergibt sich dann aus der Anzahl n_R der Rohre multipliziert mit vier Designparametern je Rohr. Um die Beschränkungen hinsichtlich dem Gestaltungsraum einhalten zu können, kann sich jeder Designparameter $Var_{i,j}$ im Bereich zwischen $Var_{i,j,min}$ und $Var_{i,j,max}$ bewegen.

Der Optimierungsalgorithmus ist infolge der Programmierung an das FE-Programm Ansys[®] gekoppelt, wobei das Modell des Diamantrahmens im FE-Programm voll parametrisch aufgebaut ist. Die Eingabe der Rahmengenometrie erfolgt durch Vorgabe der Knotenpunkt-Koordinaten. Die Scheitel der Rohrquerschnitte sind als Designparameter $Var_{i,j}$ definiert, auf die der entwickelte Algorithmus zugreift.

In Bild 18 ist die Vorgehensweise der Gestaltoptimierung dargestellt. Nach Aufbau des Modells werden die Anzahl n_R der Rohre sowie die Minimal- und Maximalwerte $Var_{i,j,min}$ und $Var_{i,j,max}$ für alle Designparameter definiert. Weiterhin sind die Vorgabe einer Schrittweite Var_step und die Eingabe der Wanddicken $Var_{i,WD}$ als Absolutwert oder durch eine Funktion in Abhängigkeit der Geometrie notwendig. Darüberhinaus wird die Zielfunktion F_{Ziel} mit der Abbruchbedingung, hier in Form einer Steifigkeit C und Masse m , festgelegt. Schließlich können durch den Abbruchparameter n_{iter} die maximal zulässige Anzahl an bleibenden Geometrieänderungen und damit die Berechnungsdauer gesteuert werden.

Anschließend werden alle Designparameter $Var_{i,j}$ auf ihre Minimalwerte $Var_{i,j,min}$ gesetzt, das System berechnet und die Steifigkeit C_0 und Masse m_0 des Ausgangssystems ermittelt.

Gesucht wird das Maximum einer Wertelandschaft mit k Unbekannten. Hierzu wird auf ein einfaches, heuristisches Optimierungsverfahren zurückgegriffen, welches auch als evolutionärer Algorithmus aufgefasst werden kann. Es fällt damit in die Kategorie der Gradientenverfahren (sogenannte Hillclimbing- oder Downhill-Simplex-Suchverfahren), die im Gegensatz zu den Simplex-Verfahren nach Nelder und Mead [76], [77] nichtlineare Problemstellungen auf einfache Art und Weise lösen. Gradientenverfahren beruhen auf der Idee, von einer gegebenen Ausgangsposition, deren Lösung bekannt ist, die Lösungen in der durch die Maximalwerte begrenzte Nachbarschaft zu ermitteln und sich, je nach Zielfunktion, zum „besten“ oder „schlechtesten“ Lösungspunkt zu bewegen. Anschließend beginnt die Suche von vorne. Die Ermittlung des Optimums nach dem „besten“ oder „schlechtesten“ Lösungspunkt in der neuen Umgebung wird abgebrochen, wenn die Zielfunktion erfüllt ist oder in der Nachbarschaft kein besserer oder schlechterer Wert mehr gefunden wird oder wenn n_{iter} erreicht ist.

Vom Minimalsystem mit bekannter Steifigkeit und Masse beginnend, wird jeder Designparameter $Var_{i,j}$ um die Schrittweite Var_step variiert und der Steifigkeits- und Massenzuwachs ermittelt, woraus sich der Gradient $\Delta STW_{i,j}$ (STW - Stiffness-to-Weight) berechnen und anschließend das System zurücksetzen lässt. Danach folgt das Variieren des nächsten Designparameters $Var_{i,j}$. Nach der Berechnung aller $Var_{i,j}$ und $\Delta STW_{i,j}$, wird die Variation mit dem größten Gradienten $\max(\Delta STW_{i,j})$ ausgewählt und der zugehörige Designparameter $Var_{i,j}$ mit der Schrittweite Var_step bleibend verändert. Danach beginnen die Änderung jedes verbleibenden Designparameters und die Ermittlung von $\Delta STW_{i,j}$ erneut. Erreicht ein Designparameter $Var_{i,j}$ den zulässigen Maximalwert $Var_{i,j,max}$, so wird er in den nachfolgenden Berechnungsschleifen übersprungen, da die Berechnung mit Eintreten der bereits genannten Abbruchbedingungen beendet ist.

Der auf diese Weise definierte Optimierungsalgorithmus könnte als eine Art Wachstumsalgorithmus bezeichnet werden, da versucht wird, die Struktur durch eine lokale Volumenvergrößerung in den höchst beanspruchten Bereichen wachsen zu lassen.

Am Beispiel eines einseitig fest eingespannten Balkens, an dessen freiem Ende eine Einzellast F_y , angreift, soll die Vorgehensweise bei der Gestaltoptimierung weiter deutlich werden. Die Teilbilder 19 a) bis d) zeigen das statische System, den zur Verfügung stehenden Designraum, die verwendete Laminatkonfiguration und die

Parameter zur Steuerung des Algorithmus. Der Balken setzt sich aus drei Rohrabschnitten zusammen, wobei der Minimal- und Maximaldurchmesser der Haupt- und Nebenscheitel auf 40 mm bzw. 100 mm begrenzt ist. Die Wanddicke $Var_{i,WD}$ ist über alle Rohre konstant mit 1 mm definiert. Als Werkstoff wird ein typischer CF-EP Mehrschichtverbund mit 50 % 0° und $\pm 45^\circ$ -Schichten fest gelegt, wobei die x -Koordinate (Balkenlängsachse) des Koordinatensystems der 0° -Faserorientierung entspricht. Das Profil besteht aus drei Rohrabschnitten mit jeweils vier Designparametern. Um eine geschlossene Oberfläche zu erhalten, sind die Scheitel der benachbarten Rohrabschnitte in den Stoßstellen miteinander gekoppelt, so dass letztendlich zur Definition des Profils vier Querschnitte ($i = 1$ bis 4) mit jeweils zwei Scheiteldurchmessern ($j = 1$ bis 2) notwendig sind. Dies ergibt für die Gesamtstruktur insgesamt acht Designvariablen $Var_{i,j}$. Die Schrittweite Var_{step} beträgt 2 mm. Als Zielfunktion ist eine minimale Durchbiegung u_y des freien Endes für jede mögliche Masse zwischen Minimal- und Maximalsystem gefordert, d.h. ein maximaler STW-Koeffizient.

Bild 19 e) zeigt das Ergebnis der Optimierung an vier herausgegriffenen Zuständen. Das Minimalsystem ($n_G = 0$) weist eine Masse m_R von 196 g bei einer Verformung u_y von 16,6 mm auf, woraus sich der STW -Wert zu $0,031 \text{ N} / (\text{mm g})$ berechnet. Nach 30 bleibenden Gestaltänderungen n_G beträgt die Verformung u_y noch 6,2 mm bei einem Gewichtszuwachs von 35 g, der STW -Wert konnte damit auf $0,070 \text{ N} / (\text{mm g})$ mehr als verdoppelt werden. Bei einer Masse von 379 g beträgt die Verformung lediglich 1,3 mm, im Vergleich zum Ausgangssystem hat sich die Masse verdoppelt und der STW -Wert mit $0,203 \text{ N} / (\text{mm g})$ fast versiebenfacht. Das Maximalsystem besitzt die geringste Verformung mit 1,1 mm bei einer Masse von 490 g, wobei aber trotz der kleinsten Verformung der STW aufgrund des hohen Massenzuwachses auf $0,186 \text{ N} / (\text{mm g})$ abgesunken ist.

Aus dem Teilbild 19 e) wird das Wachstum des Kragbalkens anschaulich. Wie zu erwarten, wird zu Beginn der Optimierungsberechnung die Querschnittshöhe vergrößert, wobei diese an der Einspannung am häufigsten und zum freien Ende weniger häufig erhöht wird. An der Einspannstelle erreicht die Querschnittshöhe den Maximalwert $Var_{i,j,max}$ zuerst, anschließend beginnt eine abwechselnde Vergrößerung der Querschnittsbreite und der -höhe der verbleibenden Designparameter. Die Kreisquerschnitte mit dem Maximaldurchmesser von 100 mm werden von der Einspannstelle hin zum freien Ende erreicht. Zuletzt nehmen die Querschnittsbreite und -höhe

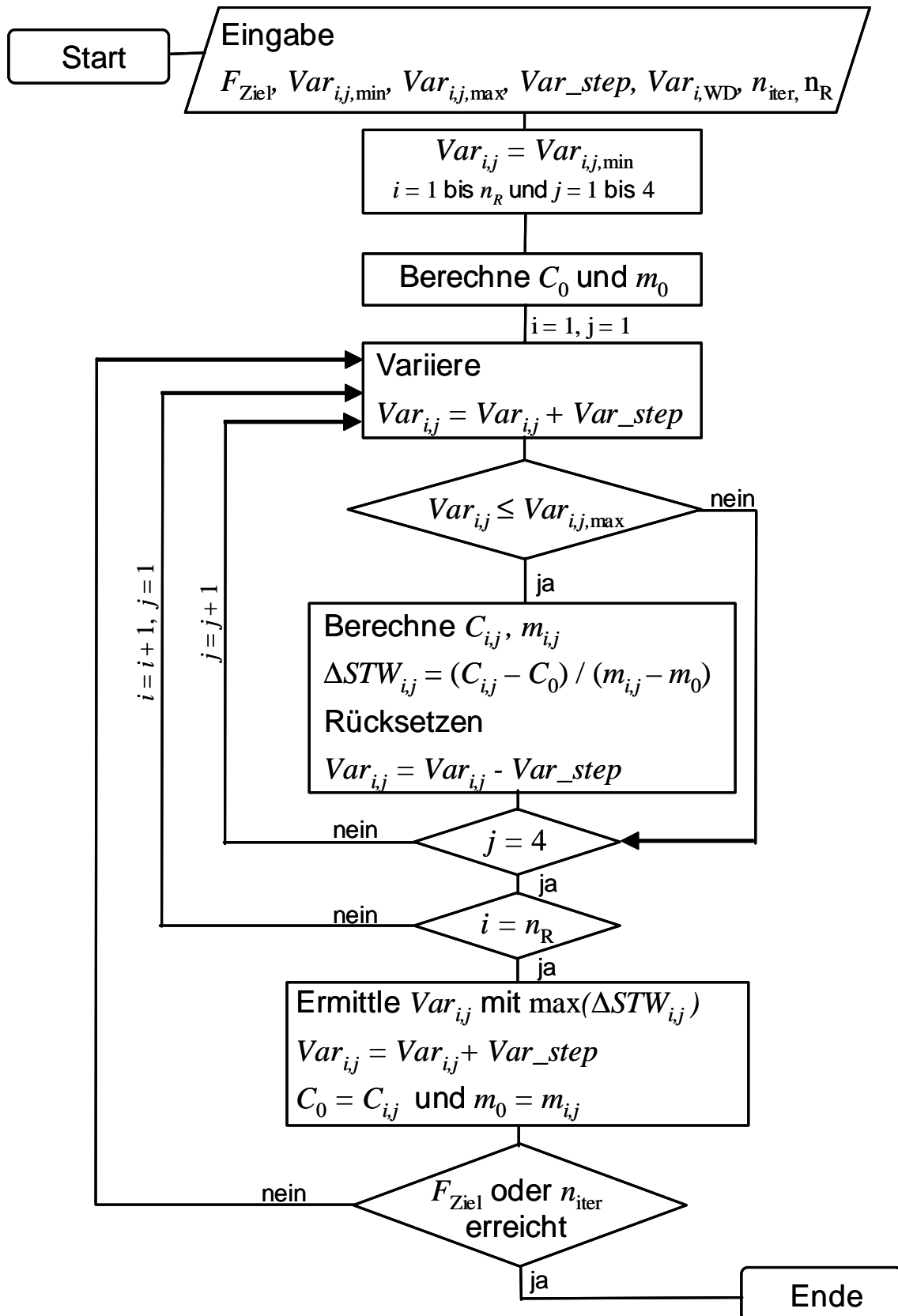
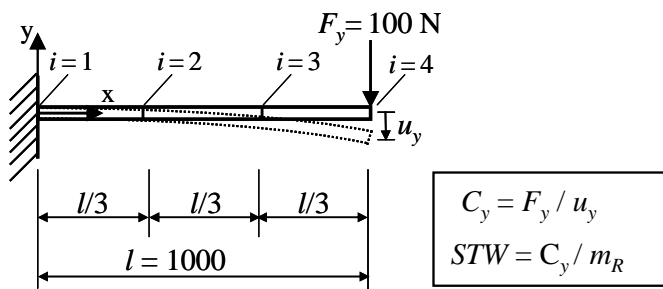
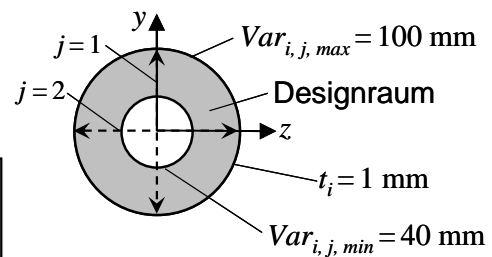


Bild 18: Flussdiagramm zur Gestaltoptimierung mit parametrischen Geometrie-FE-Modellen

a) Statisches System



b) Minimal- und Maximalscheitelwerte



c) Werkstoff

IM-EP Laminat mit 60% FVG
mit [+45/0/-45/0]_s

d) Steuerparameter

Zielfunktion: $F_{Ziel} = \max STW (Var_{i,j})$

Schrittweite: $Var_{step} = 2 \text{ mm}$

Anzahl der bleibenden Gestaltänderungen: n_G

e) Berechnungsergebnis

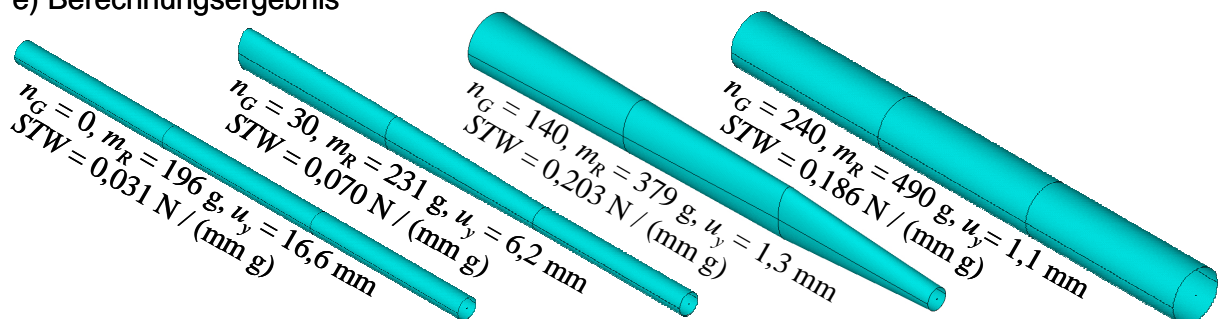


Bild 19: Gestaltoptimierung eines einseitig eingespannten Kragbalkens unter Einwirkung einer Einzellast am freien Ende

am Lastangriffspunkt ihre Maximalwerte ein, was mit einem sehr geringen Steifigkeitszuwachs verbunden ist. Bei einer Schrittweite Var_{step} von 2 mm sind 240 Gestaltänderungen zum Durchlaufen des Designraumes notwendig. Ist diese Optimierung durchgeführt, kann zu jeder erforderlichen Steifigkeit, zulässigen Durchbiegung oder gewünschten Masse die optimierte Gestalt entnommen werden.

5.2.2 Optimierung der Laminatkonfiguration

Neben der Gestalt trägt die Laminatkonfiguration in den Einzelrohren einen wesentlichen Anteil zu den Steifigkeitseigenschaften einer Struktur bei. Aus einer durchgeführten an einer Diamantrahmengeräte mit festgelegten Wanddicken, bei der nur 0° und $\pm 45^\circ$ -Schichten in den Einzelrohren betrachtet wurden, betrug die rechnerisch ermittelte, minimale Tretlagersteifigkeit bei ungünstigster Laminatkonfiguration $85,5 \text{ Nm/}^\circ$ [78]. Bild 20 zeigt beispielhaft den Einfluss der Laminatkonfiguration des Unterrohrs, der Sitzstreben und des Sitzrohrs auf die Tretlagersteifigkeit eines RR-

Rahmens. Bei einer optimalen Konfiguration konnte dagegen rechnerisch eine maximale Tretlagersteifigkeit von $191,1 \text{ Nm/}^\circ$ ermittelt werden. Innerhalb der Studie wurde eine Ausgangskonfiguration mit 50 % 0° -Schichten und 50 % $\pm 45^\circ$ -Schichten in allen Rohren gewählt. Anschließend wurde der Einfluss der Laminatkonfiguration von jedem Rohr auf die Steifigkeit ermittelt, indem der Anteil a an 0° -Schichten von 0 bis 100 % variiert wurde und der verbleibende Rest den Anteil der $\pm 45^\circ$ -Schichten bildete. Jede Parametervariation ergibt eine stetige Kurve mit einem Maximum im Intervall von 0 – 100 %, das den optimalen Anteil an 0° -Schichten widerspiegelt. Sind die Maximalwerte für jedes Rohr ermittelt, bilden diese die Ausgangskonfiguration für eine erneute Parametervariation nach dem gleichen Schema, da es durch die geänderten Steifigkeitsverhältnisse zu Kräfteumlagerungen kommen kann.

Da eine solche Vorgehensweise aufwändig ist, bietet sich wieder die Zuhilfenahme eines automatisierten Verfahrens an. Hierzu wurde der Algorithmus OpLam an das FE-Programmsystem Ansys[®] unter Verwendung der Ansys Parametric Design Language (APDL) gekoppelt, der für sich alleine oder nach einer bereits durchgeführten Gestaltoptimierung ausgeführt werden kann. Als Designparameter dienen die innerhalb der Materialkarten definierten Dicken der Einzelschichten mit den Faserorientierungen 0° , $+45^\circ$ und -45° , wobei die Gesamtdicke des Laminats konstant gehalten wird.

Die Vorgehensweise des Optimierungsalgorithmus ist in Bild 21 schematisch für ein Rohr dargestellt. Der OpLam-Algorithmus verwendet ebenfalls ein Gradientenverfahren („Uphill Climbing“) mit dem Unterschied zu OpTop, dass die Designparameter von einem beliebig wählbaren Ausgangspunkt aus vergrößert und verkleinert werden und immer der Weg des steilsten Anstiegs gesucht wird. Gestartet wird von einem Ausgangspunkt mit einem 0° -Anteil von 50 %, der in Bild 21 mit 0 bezeichnet ist. Anschließend wird oberhalb und unterhalb des Ausgangspunktes entsprechend der definierten Schrittweite die Steifigkeit ermittelt, der zugehörige Gradient berechnet und der Weg zu dem Nachbarpunkt mit dem größten Gradienten ΔC wird zurückgelegt. Ist der Gipfel der Kurve erreicht, bricht der Algorithmus ab. Die Genauigkeit und Rechenzeit hängen im Wesentlichen von der gewählten Schrittweite ab. Vernünftigerweise wählt man praktikable Schrittweiten in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Schichtdicken, die fertigungstechnisch auch umgesetzt werden können.

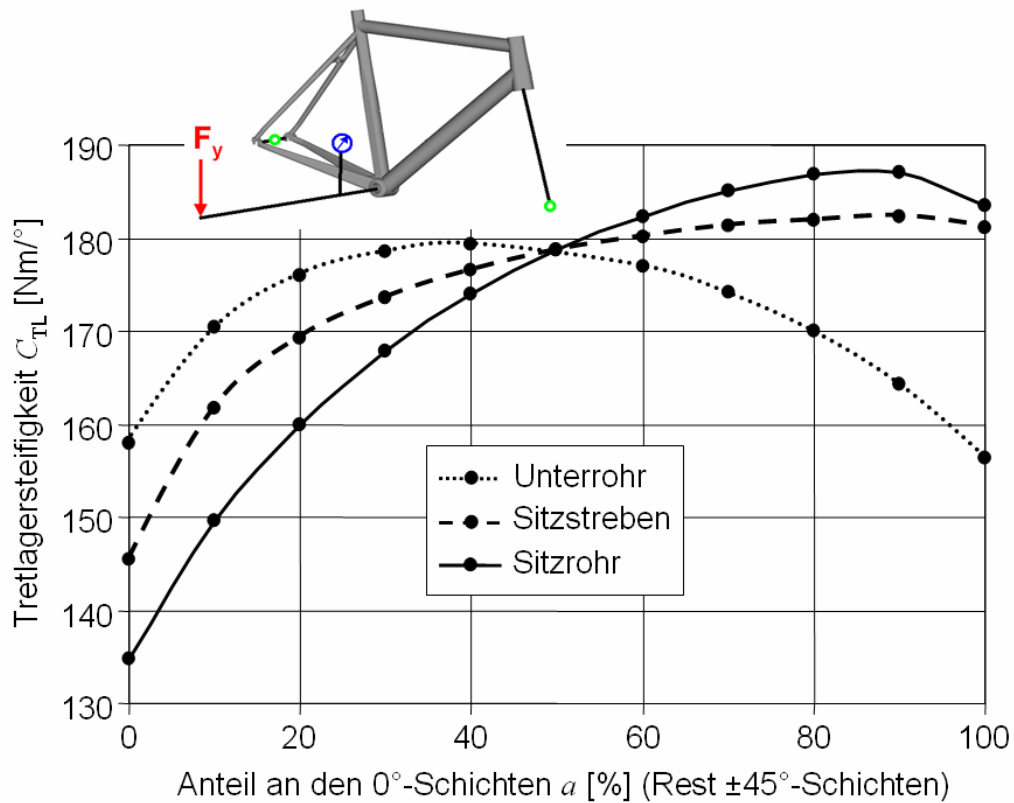


Bild 20: Einfluss der Laminatkonfiguration in den Einzelrohren auf die Tretlagersteifigkeit, ausgehend von einem 50%-Anteil an 0° und 50% 45°-Schichten in jedem Rohr für ein HM-EP Mehrschichtverbund mit 60% FVG

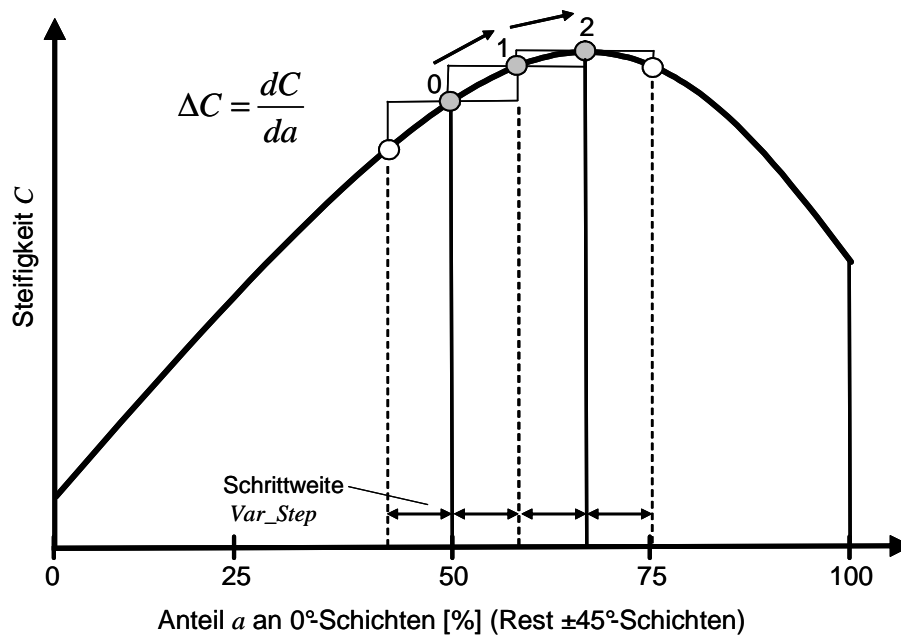


Bild 21: Optimierung der Laminatkonfiguration mit Hilfe des Uphill-Climbing Gradientenverfahrens beginnend von einer Ausgangskonfiguration mit 50% 0°-Schichten

Zur weiteren Erläuterung des Optimierungsalgorithmus zeigt Bild 22 das statische System, welches dem in Bild 19 dargestellten Ausgangssystem unter einer exzentrisch angreifenden Kraft F_z entspricht. Die einzelnen Rohrabschnitte, welche die Designparameter darstellen, sind mit $Ab_1 - Ab_3$ gekennzeichnet. In jedem dieser Abschnitte findet eine Optimierung der Laminatkonfiguration statt. Die wesentlichen Schnittgrößen des Kragbalkens sind eine über die Balkenlänge konstante Querkraft Q_z , ein konstantes Torsionsmoment M_x und ein zur Einspannstelle linear zunehmendes Biegemoment M_y . Die Schrittweite Var_step beträgt 5 %. Als Ziel wurde die betragsmäßige Minimierung der Verformung u_z am Kraftangriffspunkt vorgegeben. Bild 23 zeigt das Ergebnis der Optimierung, die 30 Rechenschritte benötigte. Durch die Optimierung der Laminatkonfiguration konnte gegenüber dem Ausgangssystem mit 50 % 0° -Schichten eine Steigerung der Steifigkeit um knapp 10 % erreicht werden. Dabei wurden die 0° -Anteile in den Rohrabschnitten $Ab_1 - Ab_3$ gegenüber der Ausgangskonfiguration um bis zu 25 % verändert. Wie erwartet, nimmt der Anteil der 0° -Schichten aufgrund des wachsenden Biegemoments zur Einspannstelle hin zu.

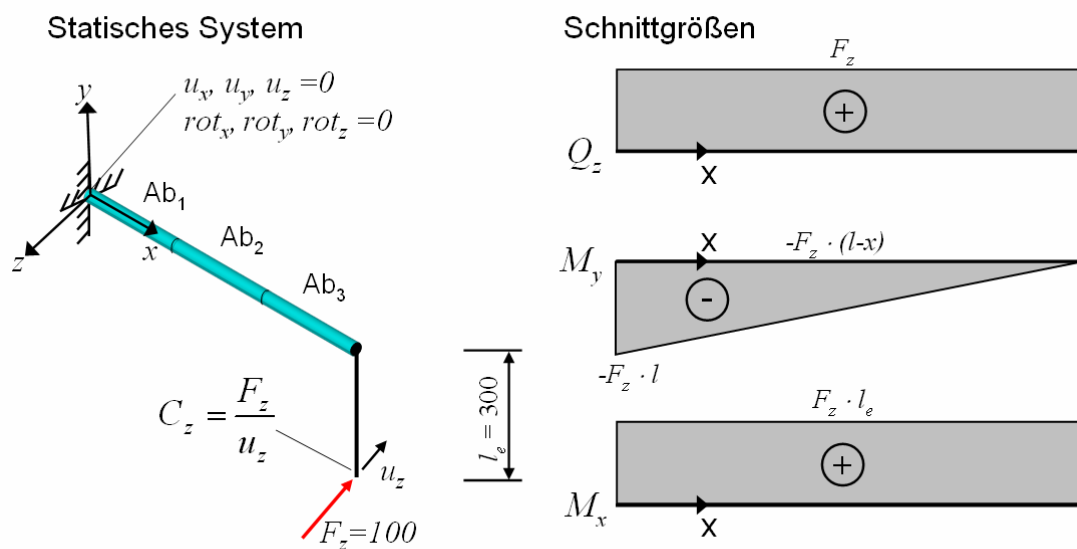


Bild 22: Statisches System des Kragbalkens mit $D = 40$ mm, $I = 1000$ mm und $t = 1$ mm unter Angriff einer exzentrischen Kraft F_z zur Optimierung der Laminatkonfiguration in den Rohrabschnitten $Ab_1 - Ab_3$ sowie Darstellung der Schnittgrößenverläufe

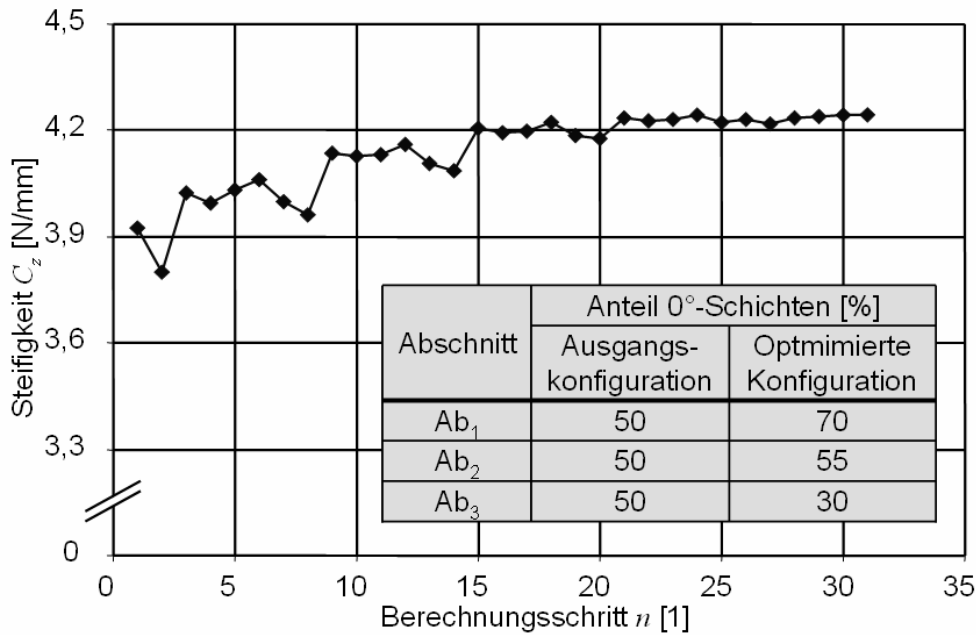


Bild 23: Verlauf der Steifigkeit über der Anzahl n der Berechnungsschritte und Anteil der 0°-Schichten in den Rohrabschnitten (Rest $\pm 45^\circ$ -Sc hichten)

5.2.3 Verwindungssteifigkeit eines Rennradrahmens

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Vorgehensweise zweier entwickelter Algorithmen zur Optimierung der Gestalt und der Laminatkonfiguration vorgestellt. An dieser Stelle werden beide Algorithmen in Reihe geschaltet mit dem Ziel, den Steifigkeits-zu-Gewichts-Koeffizienten eines Rennradrahmens zu erhöhen. Das statische Ausgangssystem ist in Bild 24 dargestellt. Das System ist an den Ausfallenden fest eingespannt und am Ende eines durch das Steuerrohr geführten starren Balkens, das dem vorderen Radaufstandspunkt entspricht, gelenkig gelagert. Die weitere Rahmengeometrie kann der Zeichnung in Anhang 1 entnommen werden. Der starre Balken ist in Höhe des oberen und unteren Steuerlagers mit dem Steuerkopf starr über Multiple Point Constrains verbunden. In der Mitte des Steuerkopfs wirkt eine Kraft F_z , die normal zur Rahmenebene steht, auf den starren Balken. Als Zielfunktion wurde eine minimale laterale Verformung u_z am Lastangriffspunkt bei einer Rahmenmasse von 0,95 kg gefordert. Die Masse des Ausgangssystems liegt bei 0,77 kg, wobei sich diese aus 0,41 kg für die Rohre und pauschal 0,36 kg für alle notwendigen Lasteinleitungskomponenten, Verbindungsmittel und die Lackierung zusammensetzt. Der Rahmen besteht aus sieben verschiedenen Rohren $Var_{i,j}$ ($i = 1, 7$) und jeweils 4 Designparametern ($j = 1, 4$), die, wie oben, die beiden Haupt- und Neben-

scheitel am Rohranfang und am -ende beschreiben. Die für jedes Rohr eingezeichnete x -Koordinate des korrespondierenden, lokalen Koordinatensystems entspricht der Rohrlängsrichtung jeden Rohres und entspricht der 0° -Faserorientierung. Die Scheibenelastizitätskenngrößen der UD-Schicht werden aus den ermittelten Tangentenmoduln E_1^t , E_2^t und G_{21} sowie der Querkontraktionszahl ν_{21} aus Tabelle 12 gebildet. Als Ausgangslaminatkonfiguration aller Rohre wurde wiederum ein Anteil an $\pm 45^\circ$ -Schichten und 0° -Schichten von 50% angenommen. Die Wanddicke $Var_{i,WD}$ der einzelnen Rohre wurde aus Erfahrungswerten in Abhängigkeit des maximalen Scheitels eines jeden Rohres über

$$Var_{i,WD} = 0,7 + \max(Var_{i,j}) \cdot 0,7 / 60 \quad \text{mit } (j = 1 \text{ bis } 4) \quad (6.3)$$

bestimmt. Die Minimal- und Maximalquerschnitte wurden aus den Richtlinien der UCI [11], Bauraumbeschränkungen und fertigungstechnischen Anforderungen abgeleitet. Bauraumbeschränkungen ergeben sich aus der notwendigen Reifen- und Kettenfreiheit, der Umwerferbefestigung, den standardisierten Steuerlagern und dem Sattelstützendurchmesser.

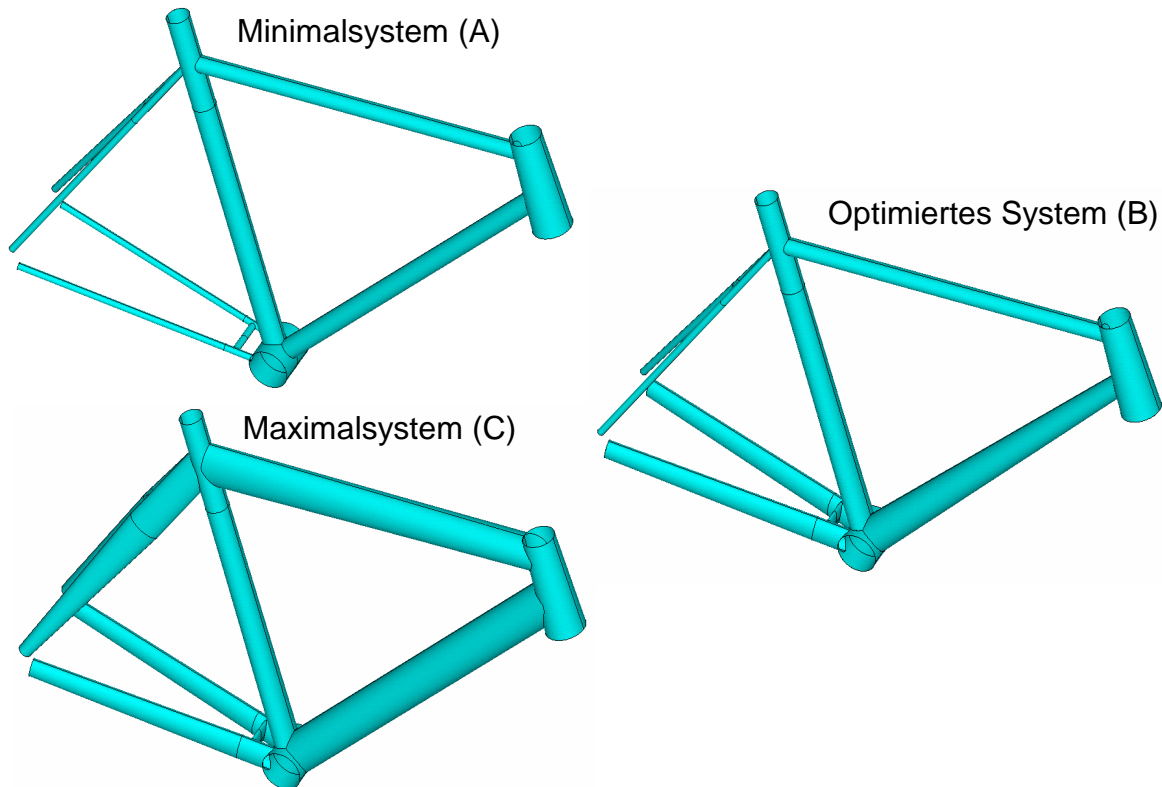
In Tabelle 9 sind die Scheitelwerte des Minimalsystems (Rahmengestalt A) und des Maximalsystems (Rahmengestalt C) aufgeführt. Zwischen diesen Grenzwerten liegt der zur Verfügung stehende Designraum. Die fett geschriebenen Designparameter können aus den vorher genannten Gründen nicht variiert werden und werden daher in der Berechnung durch eine Kontrollabfrage übersprungen. Rahmengestalt B stellt das optimierte System dar.

Bild 25 zeigt die Konfigurations- und Leistungsmerkmale der Rahmenvarianten (A), (B) und (C) sowie die resultierenden Massen der Einzelrohre und des Gesamtrahmens. Deutlich ist der Zuwachs an Steifigkeit zwischen dem Ausgangssystem und dem optimierten System erkennbar. Die Verwindungssteifigkeit C_T konnte bei einer Massenzunahme von 0,2 kg um mehr als 700 % gesteigert werden, was bezogen auf das Gewicht der Rohre eine Erhöhung der Leichtbaugüte um mehr als 500 % bedeutet. Bezogen auf das Gesamtgewicht konnte eine Erhöhung der Leichtbaugüte um mehr als 600 % erreicht werden. Der Vergleich der unterschiedlichen Rahmenkonfigurationen zeigt eine deutliche Vergrößerung des Unterrohrs im Bereich des Tretlagers und der Kettenstreben beim optimierten System.

Tabelle 9: Designparameter $Var_{i,j}$ des Minimalsystems (A) des optimierten Systems (B) und des Maximalsystems (C)

Rahmengestalt		A	B	C
	$Var_{i,j}$	$Var_{i,j, min}$	$Var_{i,j, opt}$	$Var_{i,j, max}$
Rohr		[mm]	[mm]	[mm]
Sitzstreben	$Var_{1,1}$	10	10	20
	$Var_{1,2}$	10	10	20
	$Var_{1,3}$	10	10	28
	$Var_{1,4}$	10	10	50
Kettenstreben	$Var_{2,1}$	10	20	20
	$Var_{2,2}$	10	30	30
	$Var_{2,3}$	10	23	23
	$Var_{2,4}$	10	41	41
Tretlagergehäuse	$Var_{3,1}$	60	60	60
	$Var_{3,2}$	60	60	60
	$Var_{3,3}$	60	60	60
	$Var_{3,4}$	60	60	60
Sitzrohr	$Var_{4,1}$	35	45	45
	$Var_{4,2}$	35	35	40
	$Var_{4,3}$	35	35	35
	$Var_{4,4}$	35	35	35
Unterrohr	$Var_{5,1}$	30	54	54
	$Var_{5,2}$	30	54	59
	$Var_{5,3}$	30	33	54
	$Var_{5,4}$	30	30	64
Oberrohr	$Var_{6,1}$	25	25	34
	$Var_{6,2}$	25	25	70
	$Var_{6,3}$	25	25	48
	$Var_{6,4}$	25	25	50
Steuerkopf	$Var_{7,1}$	60	60	60
	$Var_{7,2}$	60	60	60
	$Var_{7,3}$	48	48	48
	$Var_{7,4}$	48	48	48

nicht veränderbare Designparameter fett



Rahmengestalt		A	B	C
Gesamtmasse m_{ges}	[kg]	0,76	0,96	1,30
Masse der Einzelrohre m_{R}	[kg]	0,40	0,60	0,94
Verwindungssteifigkeit C_{T}	[N/mm]	2,5	19,2	32,5
$STW-C_{\text{T,ges}}$	[N/(mm kg)]	3,2	20,0	24,9
$STW-C_{\text{T,R}}$	[N/(mm kg)]	6,2	32,0	34,6
Anteil 0°-Schichten				
Kettenstreben (Sitzstreben)	[%]	50	100	50
Sitzstreben (Kettenstreben)	[%]	50	50	50
Tretlagergehäuse	[%]	50	25	50
Sitzrohr	[%]	50	80	50
Unterrohr	[%]	50	95	50
Oberrohr	[%]	50	0	50
Steuerrohr	[%]	50	15	50

Bild 25: Gestaltparameter und Leistungsmerkmale des Minimalsystems (A) und des Maximalsystems (C) mit der Ausgangslaminatkonfiguration sowie der gestalt- und laminatoptimierten Struktur (B)

darin zu suchen, dass die mit dem größten Gradienten behafteten Designparameter ihre Maximalwerte erreicht haben und dadurch im weiteren Verlauf der Optimierung lediglich weniger effektive Parameter verändert werden können (Scheitelwerte des

Oberrohrs, der Sitzstreben und des Unterrohrs im Bereich des Anschlusses zum Steuerkopf).

Bild 26 zeigt die Änderung der Verwindungssteifigkeit C_T , des STW-Koeffizienten $STW-C_{T, ges}$ und der Gesamtmasse m_{ges} über der Anzahl der Berechnungsschritte n . Nach 690 Berechnungsschritten in OpTop ist die Abbruchbedingung von 0,95 kg erreicht, und der Algorithmus wechselt in die Optimierung der Laminatkonfiguration, innerhalb derer die Masse konstant bleibt. Nach Beendigung der Gestaltoptimierung erreicht die Verwindungssteifigkeit C_T einen Wert von 16,2 N/mm und die Steifigkeit konnte gegenüber dem Minimalsystem um 500 % bei einem Massezuwachs von 26 % gesteigert werden. Innerhalb der Optimierung der Laminatkonfiguration führten 152 weitere Berechnungsschritte zu einer Endsteifigkeit von 19,2 N/mm, was einem Zuwachs der Verwindungssteifigkeit C_T und des $STW-C_{T, ges}$ von 19 % gegenüber der reinen Gestaltoptimierung bedeutet.

Während der Kurvenverlauf der Masse m annähernd linear bis zum Ende der Gestaltoptimierung wächst, ist der Verlauf der Steifigkeit C_T und des $STW-C_{T, ges}$ undulierend. Zu Beginn des Berechnungslaufes werden 18 Designparameter variiert, wobei

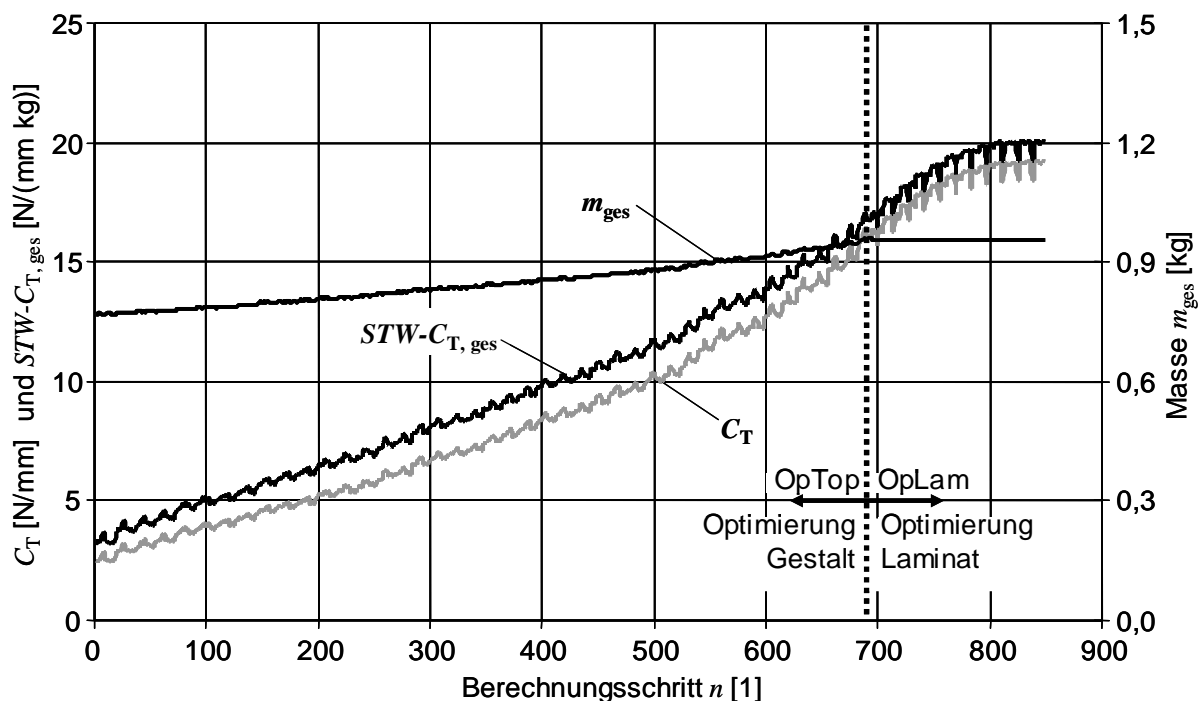


Bild 26: Verwindungssteifigkeit C_T , STW-Koeffizient $STW-C_{T, ges}$ und Gesamtmasse

m_{ges} über den Berechnungsschritten n

der Parameter mit dem höchsten $\Delta STW-C_{T, ges}$ die bleibende Gestaltveränderung bewirkt und die Variation der Designparameter von vorne beginnt. Mit zunehmender Anzahl an Gestaltveränderungen nehmen mehr und mehr Designparameter ihre Maximalwerte ein und können daher nicht mehr vergrößert werden, wodurch die Zahl der noch variierbaren Designparameter sinkt und die Ondulation kürzer wird. Bei Erreichen der Abbruchbedingung sind von den ehemals 18 Designparametern noch 14 variierbar. Insgesamt werden innerhalb der Optimierung 43 Geometrieänderungen vorgenommen, die zu dem in Bild 25 B dargestellten optimierten System führten. Ist eine Zielgröße nicht eindeutig gefordert, bietet es sich an, den gesamten freien Designraum vom Minimal- bis zum Maximalsystem zu durchlaufen. Danach ist zu jedem Rechenschritt mit einer bleibenden Gestaltänderung und der zugehörigen Masse m_R die optimierte Steifigkeit C_T bekannt. Für die Verwindungssteifigkeit des bereits betrachteten RR-Rahmens wurden hierzu 1224 Berechnungsschritte mit einer Gesamtrechendauer von knapp 2 Tagen benötigt. Anschließend besteht dann die Möglichkeit, zu jeder berechneten Gestalt eine Optimierung der Laminatkonfiguration durchzuführen.

Bild 27 zeigt die Verwindungssteifigkeit C_T und den Steifigkeit-zu-Gewicht Koeffizienten $STW-C_{T, ges}$ in Abhängigkeit des Rahmengesamtgewichts m_{ges} , wobei zur besseren Übersicht nur die Werte bei einer bleibenden Gestaltänderung dargestellt sind. In diesem Fall werden die Designparameter 124 mal verändert, bis der zur Verfügung stehende Designraum vollständig durchlaufen ist. Nach einem anfänglich näherungsweise linearen Bereich folgt ein Abfall im Kurvenverlauf mit einer zunehmend flacheren Neigung der beiden dargestellten Kurven. Im „Knie“ der Kurve nehmen die Querschnitte von Kettenstreben und Unterrohr, die maßgeblich zur Steifigkeit beitragen, ihre Maximalwerte ein, worauf Änderungen von ineffizienteren Querschnitten mit nur geringen Zuwächsen folgen. Der Gradient des $STW-C_{T, ges}$ -Verlaufs nimmt mit zunehmender Masse ab.

Die beiden entwickelten Algorithmen OpTop und OpLam eignen sich zur Steifigkeitsoptimierung von Fahrradrahmen in Differentialbauweise. Auf „Knopfdruck“ liefert das Programm die erforderliche Rahmengestalt und die Laminatkonfiguration, die als Grundlage für die Konstruktion des Rahmens dienen. Nach dem Rechenvorgang im FE-Programm erfolgt anschließend die Übergabe der Bauteilinformationen in die CAD-Umgebung.

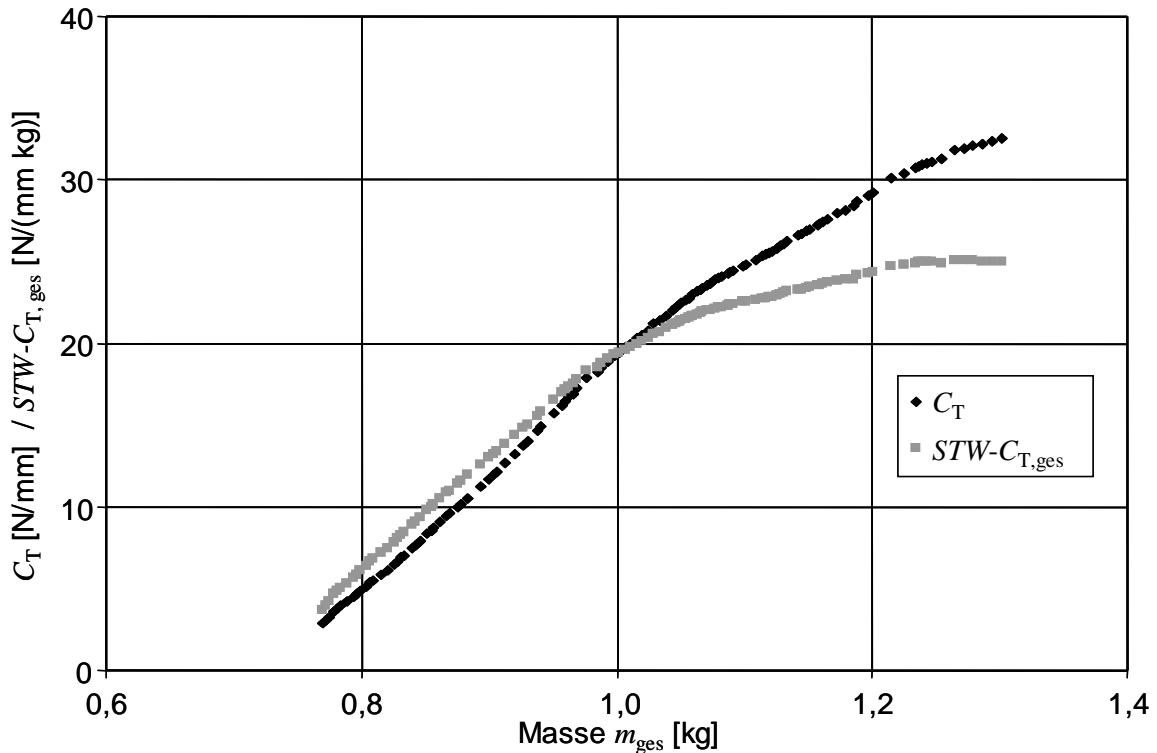


Bild 27: Steifigkeit C_T und STW-Koeffizienten $STW-C_{T,ges}$ über Masse m_{ges}

Bevor die Optimierung gestartet wird, ist zu berücksichtigen, welche Laminatkonfiguration für die Gestaltoptimierung in den Einzelstrukturen gewählt wird, da diese die Steifigkeitseigenschaften der statisch unbestimmten Gesamtstruktur und dadurch die Kräfteverteilung beeinflussen, die letztendlich das „Rohrwachstum“ steuern.

Jedoch bietet die Vorgabe einer Laminatkonfiguration beim Optimierungsbeginn auch Vorteile, da konstruktive und fertigungstechnische Anforderungen, welche sich wesentlich in Einschränkungen der Laminatgestaltung äußern, von Beginn an berücksichtigt werden können und dadurch praxisrelevante Optimierungsergebnisse berechnet werden. Die Anforderungen beinhalten, dass im Rahmenbau vorzugsweise Lamine mit mindestens drei Faserrichtungen verwendet werden sollen, damit alle erdenklichen Belastungszustände, die auch über die normalen Betriebsbeanspruchungen hinausgehen, hauptsächlich durch Faserkräfte aufgenommen werden können. Weiterhin ist es vorteilhaft, möglichst dünne Schichtdicken zu verwenden und eine Änderung in der Faserorientierung benachbarter Schichten vorzusehen, um ein gutmütigeres Rissverhalten zu erreichen

Zur Überprüfung der Ergebnisse der Gestaltoptimierung wurde das dem Uphill-Climbing-Verfahren konträre Downhill-Climbing-Verfahren gewählt. Ausgehend vom Maximalsystem wurde der Nachbarpunkt mit dem geringsten Abstieg ermittelt. Der

Vergleich beider Vorgehensweisen zeigte bei den untersuchten Systemen eine vollständige Übereinstimmung im gewählten Pfad zwischen Minimal- und Maximalsystem.

5.3 Einzelschichtbasierte Festigkeitsanalyse

Das Ziel der Festigkeitsanalyse ist die Abschätzung der Beanspruchbarkeit und Haltbarkeit eines Bauteils unter einer gegebenen Belastung. Dadurch können im Analyseprozess einerseits Schwachstellen aufgedeckt und beseitigt sowie Einsparpotenziale erkannt und genutzt werden. In der Konstruktion ist die statische Festigkeitsanalyse am weitesten verbreitet, auch dann, wenn Bauteile, wie Fahrradrahmen, in der Regel zyklisch wirkenden Beanspruchungen ausgesetzt sind. Der hohe experimentelle Aufwand zur Ermittlung der Eingangskenngrößen, die noch herrschende Unsicherheit bei der Schwingfestigkeit [79] sowie die zu erwartende Vorhersageungenauigkeit sind Gründe, warum die rechnerische FKV-Lebensdauervorhersage in der Entwicklungsphase von FKV-Bauteilen gemieden wird. Die statische Festigkeitsanalyse kann die Lebensdauer eines zyklisch beanspruchten Bauteils nicht vorhersagen, hilft aber, Orte hoher Werkstoffanstrengung zu beseitigen, was sicherlich auch zu einer Verlängerung der Lebensdauer eines Bauteils führt. In einer Vielzahl von Anwendungsbereichen, wie der Luft- und Raumfahrt oder dem Bauwesen, werden statische Berechnungen durchgeführt und mit Hilfe von Sicherheitskonzepten versucht, zyklischen Beanspruchungen durch Sicherheitsfaktoren sowohl auf der Belastungs- als auch auf der Werkstoffseite zu begegnen und Rechnung zu tragen. Sicherheitskonzepte für die Dimensionierung von FKV-Fahrradrahmen existieren nicht, Anhaltswerte können aber auch aus veröffentlichten Erfahrungsberichten der Hersteller und durch Prüfstandsversuche gewonnen werden. Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Festigkeitsanalyse in der Bauteilentwicklung unterstützend wirken kann, die abschließende Bauteilprüfung aber nicht zu ersetzen vermag.

In den letzten Jahrzehnten hat sich die einzelschichtbasierte Festigkeitsanalyse als ingenieurmäßig sinnvolle Herangehensweise zur Festigkeitsabschätzung multidirektional verstärkter Lamine entwickelt [39]. Diese stellt derzeit den besten Kompromiss zwischen Genauigkeit, Effizienz und Anwendbarkeit dar, wobei auch hier der Aufwand zur Ermittlung notwendiger Eingangsparameter sowie der Grad der Komplexität der Modellansätze unterschiedlich hoch angesetzt werden kann. Die Grundlage der Festigkeitsanalyse bildet die UD-Einzelschicht, wobei die Eigenschaften

parallel zur Faser faserdominiert und die Eigenschaften senkrecht zur Faser und die Schubeigenschaften matrixdominiert sind. Die Betrachtung der Spannungskomponenten erfolgt im faserparallelen Koordinatensystem (KOS), wobei die 1-Koordinate parallel zur Faserrichtung, die 2-Koordinate senkrecht zur 1-Koordinate und in der Schichtebene verläuft sowie die 3-Koordinate, die als Normale auf der Schichtebene steht und in „Dickenrichtung“ orientiert ist. Die möglichen Schädigungsformen Zwischenfaser- und Faserbruch der UD-Einzelschicht wurden in Kapitel 5.1 bereits erläutert.

Bei der Betrachtung eines UD-faserverstärkten Laminats entspricht das Erstschichtversagen (first ply failure, FPF) unabhängig von den Schädigungsformen Faserbruch oder Zwischenfaserbruch zwangsläufig dem Totalversagen des Laminats. Im MSV führt das Erstversagen einer Schicht in der Regel nicht zum Totalversagen des Laminats, da häufig zuerst unterkritische Zwischenfaserbrüche auftreten. Nach der Rissbildung findet eine Spannungsumlagerung in die intakten Nachbarschichten statt, so dass weitere Laststeigerungen bis zum Eintritt eines kritischen Schichtversagens (last ply failure, LPF) möglich sind. Zur vollständigen kontinuumsmechanischen Festigkeitsanalyse und zur rechnerischen Vorhersage der Spannungs-

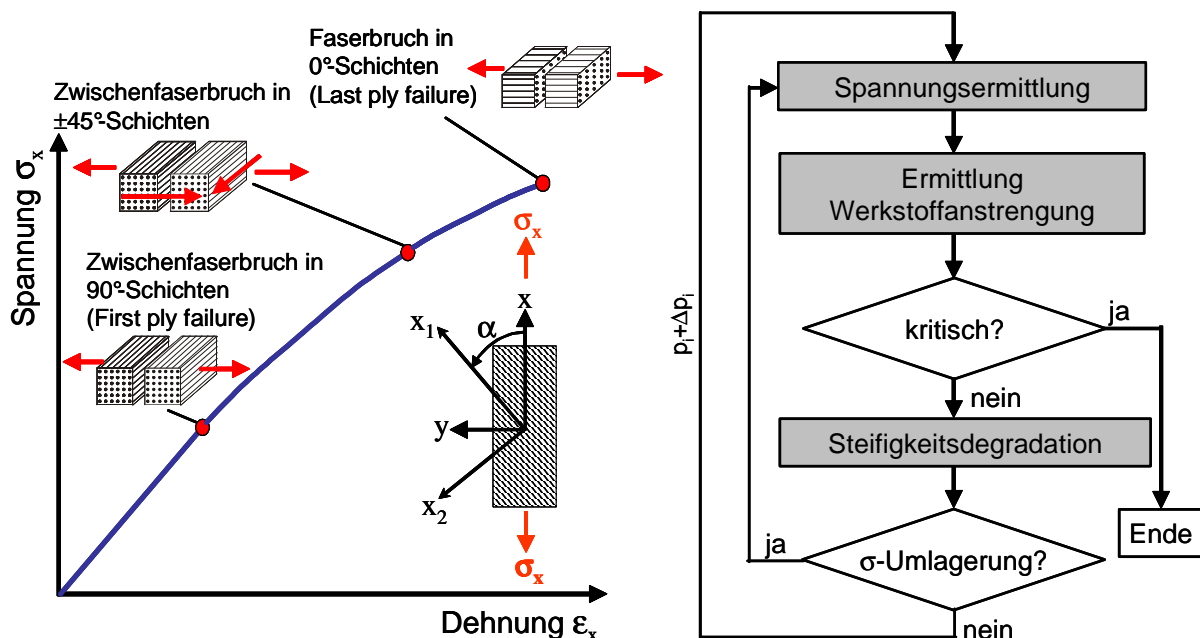


Bild 28: Spannungs-Dehnungs-Beziehung eines quasi-isotropen Laminats unter zügiger einachsiger Zugbeanspruchung [46] und Berechnungsablauf der schichtenweisen Festigkeitsanalyse mit den drei Bausteinen nach Puck [80]

Verzerrungs-Kurve eines multidirektional verstärkten FKV-Laminats (vgl. Bild 28) werden nach Puck [80] drei Bausteine benötigt:

- 1) zuverlässige Spannungsermittlung in den Einzelschichten
- 2) geeignetes Festigkeitskriterium zur Ermittlung der Werkstoffanstrengung und der Versagensform
- 3) an das Festigkeitskriterium angepasstes Steifigkeitsdegradationsmodell zur Beschreibung des Nachrissverhaltens für unterkritische Zwischenfaserbrüche

Die zugehörigen Grundfestigkeiten der UD-Schicht können experimentell ermittelt werden. Bei Normalbeanspruchung parallel (\parallel) und senkrecht (\perp) zur Faserrichtung sind die Zug- und Druckbeanspruchungen, Index t (tension) bzw. c (compression), zu unterscheiden, da sie unterschiedliche Versagensformen bewirken. Bei der Schubfestigkeit wählt man sinnvollerweise die an einem Schnittufer parallel zur Faserrichtung wirkende Kenngröße, da diese eine geringere Festigkeit aufweist [79]. Die Grundfestigkeiten mit Ihren Symbolen sind in Tabelle 10 aufgeführt.

In der Dimensionierung hat sich die FE-Methode als geeignetes Ingenieurswerkzeug etabliert. Während sich im Rahmen der statischen Auslegung von FKV-Strukturen mit kommerziell erhältlichen FE-Programmen bei der Ermittlung des Verformungsverhaltens gute Vorhersagen erzielen lassen, ist die FE-basierte Festigkeitsanalyse nach wie vor unzureichend und zum Teil deutlich fehlerbehaftet. In kommerziell erhältlichen FE-Programmen fehlt es an Werkstoffmodellen, die eine zuverlässige Beschreibung der werkstofflichen Nichtlinearitäten von FKV zulassen. Falls physikalisch nichtlineare Werkstoffmodelle für anisotrope Werkstoffe überhaupt implementiert sind, so handelt es sich häufig um das elastisch-plastische Modell von Hill [81], das für schwach ausgeprägte Anisotropien eingesetzt werden kann, für FKV aber völlig ungeeignet ist. Weiterhin verfügen die Programme nicht über differenzierende Festigkeitskriterien, wie beispielsweise das Kriterium von Hashin [82] oder Puck [80], die die Unterscheidung von Bruchmoden zulassen, sondern über wenig aussagekräftige Pauschalkriterien wie das Tsai-Hill oder Tsai-Wu-Kriterium ([83], [84]). Ein Überblick über Festigkeitskriterien kann [85] – [88] entnommen werden. Schließlich sind in den kommerziell erhältlichen FE-Programmen keine FKV-Werkstoffmodelle vorhanden, die das Nachrissverhalten kontinuumsmechanisch abbilden können und eine Vorhersage bis zum LPF erlauben.

An dieser Stelle wird auf den World Wide Failure Exercise (WWFE [87], [88]) hingewiesen, der über einen Zeitraum von zwölf Jahren durchgeführt wurde und einen

Tabelle 10: Grundfestigkeiten eines UD-Laminats unter der Annahme eines ebenen Spannungszustands [79]

Beanspruchung	Grundfestigkeit
Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung	R_{\parallel}^t
Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung	R_{\parallel}^c
Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung	R_{\perp}^t
Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung	R_{\perp}^c
Schubfestigkeit in der Schichtebene	$R_{\perp\parallel}$

ausführlichen Überblick über 19 Theorien zur Festigkeitsvorhersage beinhaltet und das Potential der Theorien bezüglich der Vorhersagequalität auf die Probe gestellt hat. Innerhalb des WWFE wurden die Theorien mit experimentell ermittelten Ergebnissen, die an einfachsten Probekörpern ermittelt wurden, verglichen. Dabei zeigte sich deutlich, dass die Festigkeitsanalyse mit einem beträchtlichen Mehraufwand verbunden ist und die Möglichkeiten derzeit erhältlicher FE-Programme weit übersteigt. Für eine zuverlässige Dimensionierung von FKV-Strukturen ist deshalb ein Werkzeug innerhalb einer FE-Umgebung zur vollständigen schichtenweisen Bruchanalyse zwingend notwendig.

5.3.1 Modell zur einzelschichtbasierten Festigkeitsanalyse

Für eine zuverlässige Festigkeitsanalyse von FKV-Strukturen ist die möglichst genaue Ermittlung der Spannungen in den Einzelschichten notwendig, da aus diesen die Werkstoffanstrengung f_E ermittelt wird. Studien an CFK- und GFK-Proben zeigten insbesondere bei den $(\tau_{21}-\gamma_{21})$ - und $(\sigma_2-\varepsilon_2)$ -Beziehungen [89] – [93] deutliche werkstoffliche Nichtlinearitäten, weiterhin wurde eine Unstetigkeit des faserparallelen Zug- und Druck-Elastizitätsmoduls im Koordinatenursprung der $(\sigma_1-\varepsilon_1)$ -Kurven beobachtet. Bild 29, links, zeigt die charakteristischen Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen eines UD-verstärkten CF-EP. Linear elastische Berechnungen unter Verwendung von Tangenten- $E_{ij}^T = d\sigma_{ij} / d\varepsilon_{ij}$ oder Sekantenmoduln $E_{ij}^S = \sigma_{ij} / \varepsilon_{ij}$ können dazu führen, dass die Spannungen und Verformungen nicht ausreichend genau ermittelt werden, siehe Bild 29, rechts. Beispielsweise führt die Verwendung des Ursprungs-Tangentenmoduls aufgrund überhöhter berechneter Spannungen oftmals

zur vorzeitigen Vorhersage von Zwischenfaserbruch, während gleichzeitig die Verformungen unterschätzt werden [80].

Zur Berücksichtigung nichtlinearer Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen können sowohl Tangenten- als auch Sekantenmodul verwendet werden [92]. Nahas schlägt in [93] eine Sekantenmodul-Iterationstechnik zur Berechnung des Spannungszustands in UD-faserverstärkten Einzelschichten vor, wofür die Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen durch Näherungsfunktionen mathematisch beschrieben werden müssen. Bild 29, links, zeigt die Funktionsweise der Sekantenmodul-Iterationstechnik, welche als quasi-linear elastisches Berechnen unter Verwendung spannungsabhängiger Elastizitätsgrößen betrachtet werden kann. Diese Vorgehensweise ist für FKV zulässig, da die werkstofflichen Nichtlinearitäten im Wesentlichen durch Mikroschäden entstehen [79]. In der Modellvorstellung folgt der Belastungspfad dem nichtlinearen Kurvenverlauf bis Erreichen des Lastniveaus und der Entlastungspfad dem Sekantenmodul des höchsten aufgetretenen Spannungsniveaus.

Beginnend mit Hilfe des Ursprungs-Tangentenmoduls wird zunächst eine Spannung $\sigma_{ij}(1)$ ermittelt, wobei die zugehörige linear-elastische Verzerrung $\varepsilon_{ij}(1)$ deutlich von der eigentlichen Spannungs-Verzerrungs-Beziehung abweicht. Durch Einsetzen von $\sigma_{ij}(1)$ in die Näherungsfunktion erhält man die zur Spannung $\sigma_{ij}(1)$ gehörende fiktive Verzerrung und den sich daraus ergebenden Sekantenmodul $E_{ij}(2)$. Dieser dient als Grundlage für den nächsten Berechnungsschritt, der die Spannung $\sigma_{ij}(2)$ liefert. Mit der gleichen Vorgehensweise wird der Sekantenmodul $E_{ij}(3)$ ermittelt und die Berechnung erneut durchgeführt. Durch die Iteration erfolgt eine Annäherung an die Spannungs-Verzerrungs-Beziehung, bis eine vom Anwender vorgegebene Genauigkeitsschranke erreicht oder unterschritten wird.

Die werkstofflichen Nichtlinearitäten sind bei den $(\sigma_2 - \varepsilon_2)$ - sowie für die $(\tau_{21} - \gamma_{21})$ -Beziehungen am deutlichsten ausgeprägt. Zur Abbildung der werkstofflichen Nichtlinearitäten von FKV hat sich die ursprünglich zur Beschreibung von Metallen entwickelte Ramberg-Osgood-Gleichung [94] in einer von Weber und Schürmann [95] modifizierten Form als besonders geeignet herausgestellt:

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E_0} + \xi_p \left(\frac{\sigma}{\sigma_p} \right)^e \quad (5.1)$$

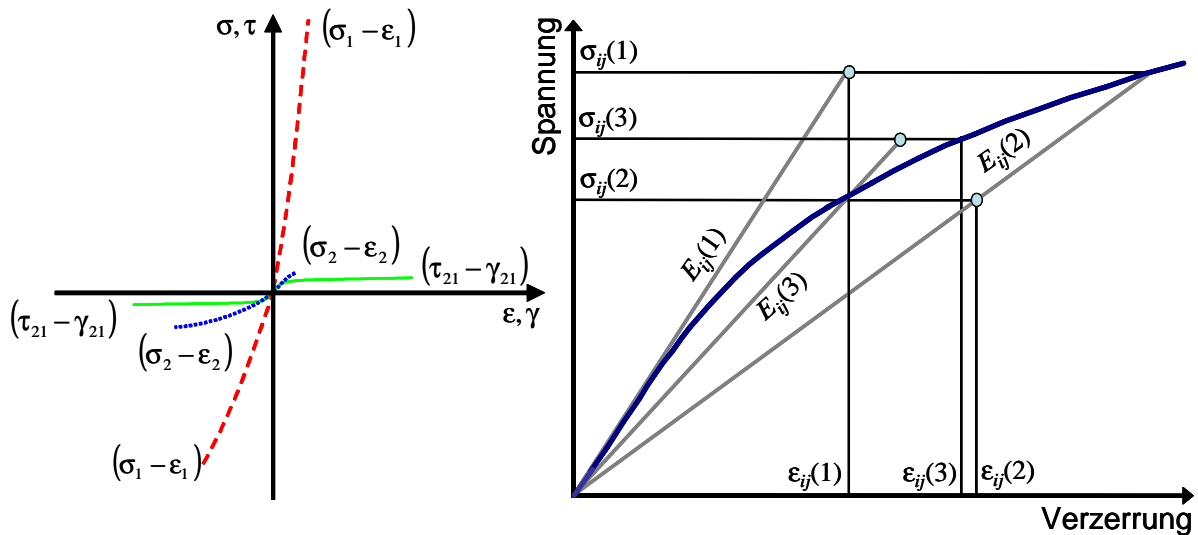


Bild 29: qualitative Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen eines typischen UD-Laminats aus CF-EP unter zügig einachsiger Belastung im faserparallelen KOS und Funktionsweise der Sekantenmoduliterationstechnik

In Gl. (5.1) bezeichnet E_0 die Steigung der Werkstoffkurve im Koordinatenursprung, mit den Parametern ξ_p , σ_p und e kann der Kurvenverlauf an die Messergebnisse angepasst werden.

Zur Festigkeitsanalyse wurden Festigkeitsbedingungen ausgewählt, die eine Unterscheidung der elementaren Bruchmoden Faserbruch und Zwischenfaserbruch zulassen. Das Maximal-Spannungs-Kriterium wird für die Ermittlung der Faserbruch-Anstrengung, Gln. (5.2) und (5.3), ausgewählt [41]:

$$\sigma_1 \geq 0: \quad \frac{\sigma_1}{R_{\parallel}^+} = f_E \quad (5.2)$$

$$\sigma_1 < 0: \quad \frac{|\sigma_1|}{R_{\parallel}^-} = f_E \quad (5.3)$$

Zur Bewertung von Zwischenfaserbruch wird das Wirkebenenkriterium von Puck [80] für den ebenen Spannungszustand verwendet. Die wesentlichen Vorteile dieses Kriteriums bestehen in der differenzierenden Bewertungsmöglichkeit zwischen dem unterkritischen, sich öffnenden Modus-A-Zwischenfaserbruch und dem durch überwiegend Schubspannungen leicht überdrückten Modus-B-Zwischenfaserbruch sowie dem durch hohe Drucknormalspannung ausgelösten, unter bestimmten Voraussetzungen kritischen und zum Totalversagen führenden, Modus-C-Zwischenfaserbruch.

Dieses Zwischenfaserbruch-Kriterium stellt durch die Ermittlung des Bruchwinkels θ_{fp} auch Informationen über die Lage der Bruchebene (fracture plane, fp) bereit. Das Kriterium berücksichtigt, dass nur die auf der eintretenden Bruchfläche wirkenden Spannungskomponenten den Bruch auslösen können. Wie in Bild 30 dargestellt, sind dies die Normalspannung σ_n , sowie die beiden in der Bruchfläche wirkenden Schubspannungskomponenten τ_{nt} und τ_{n1} . Da im räumlichen Spannungszustand die Bruchebene zunächst unbekannt ist, ist es erforderlich, die Spannungskomponenten σ_2 , σ_3 , τ_{32} , τ_{31} und τ_{21} auf alle theoretisch eintretenden Bruchebenen zwischen -90° und $+90^\circ$ zu transformieren. Die Ebene, auf der zuerst die Beanspruchbarkeit erreicht ist, wird höchstwahrscheinlich die Bruchebene werden. Im Sonderfall des ebenen Spannungszustands kann der Bruchwinkel θ_{fp} , über

$$\theta_{fp} = \arccos \sqrt{\frac{R_{\perp\perp}^A}{-\sigma_2^*}} \quad (5.4)$$

* σ_2 Quernormalspannung bei Bruch.

berechnet und die Werkstoffanstrengung direkt aus den Spannungskomponenten σ_2 , und τ_{21} ermittelt werden. Die Werkstoffanstrengung kann mit den Gln. (5.5), (5.6) und (5.7) für die verschiedenen Bruchmoden ermittelt werden.

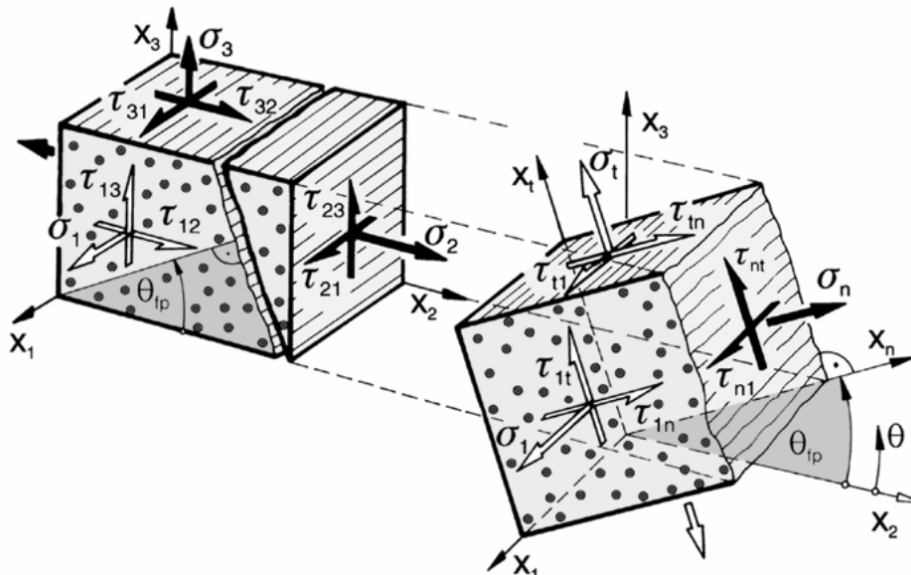


Bild 30: Auf der Zwischenfaserbruche ebene wirkende Spannungskomponenten σ_n , τ_{nt} und τ_{n1} unter dem Bruchwinkel θ_{fp} [80]

Modus A

$$\sigma_2 \geq 0: \quad \sqrt{\left(1 - p_{\perp\parallel}^t \frac{R_{\perp}^t}{R_{\parallel}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_2}{R_{\perp}^t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{21}}{R_{\parallel}}\right)^2} + p_{\perp\parallel}^t \frac{\sigma_2}{R_{\perp\parallel}} = f_E \quad (5.5)$$

Modus B

$$\sigma_2 < 0 \quad \text{und} \quad 0 \leq \left| \frac{\sigma_2}{\tau_{21}} \right| \leq \left| \frac{R_{\perp\perp}^A}{\tau_{21,c}} \right|: \quad \sqrt{\left(\frac{\tau_{21}}{R_{\perp\parallel}}\right)^2 + \left(\frac{p_{\perp\parallel}^c}{R_{\perp\parallel}} \sigma_2\right)^2} + \frac{p_{\perp\parallel}^c}{R_{\perp\parallel}} \sigma_2 = f_E \quad (5.6)$$

Modus C

$$\sigma_2 < 0 \quad \text{und} \quad 0 \leq \left| \frac{\tau_{21}}{\sigma_2} \right| \leq \left| \frac{\tau_{21,c}}{R_{\perp\perp}^A} \right|: \quad \left[\left(\frac{\tau_{21}}{2(1 + p_{\perp\perp}^c) R_{\perp\parallel}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{R_{\perp}^c} \right)^2 \right] \frac{R_{\perp}^c}{(-\sigma_2)} = f_E \quad (5.7)$$

Neben den Bruchwiderständen R sind in den Gln. (5.5) bis (5.7) werkstoffspezifische Neigungsparameter $p_{\perp\parallel}^t$ und $p_{\perp\parallel}^c$

$$\sigma_2 \geq 0 \quad p_{\perp\parallel}^t = \left(\frac{d\tau_{12}}{d\sigma_2} \right)_{\sigma_2=0} \quad (5.8)$$

$$\sigma_2 \leq 0 \quad p_{\perp\parallel}^c = - \left(\frac{d\tau_{12}}{d\sigma_2} \right)_{\sigma_2=0} \quad (5.9)$$

formuliert, die die Steigung der Bruchkurven beim Übergang von Quer-Zug- auf Quer-Druckspannungen beschreiben. Die Neigungsparameter können in biaxialen Versuchen ermittelt werden. Als Empfehlungswerte für CFK gibt Puck in [79], [96] für $p_{\perp\parallel}^t = 0,35$ und für $p_{\perp\parallel}^c = 0,30$ an. Die Parameter $p_{\perp\perp}^t$ und $p_{\perp\perp}^c$ werden gleichgesetzt und nach

$$p_{\perp\perp}^c = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 2 \cdot p_{\perp\parallel}^c \cdot \frac{R_{\perp}^c}{R_{\parallel}}} - 1 \right) \quad (5.10)$$

bestimmt [91] oder als Empfehlungswerte zu $p_{\perp\perp}^c = 0,25$ bis $0,30$ gesetzt [79]. Weiterhin gilt für den Wirkebenen-Bruchwiderstand $R_{\perp\perp}^A$

$$R_{\perp\perp}^A = \frac{R_{\perp}^c}{2 \cdot (1 + p_{\perp\perp}^c)} \quad (5.11)$$

und für die Schubfestigkeit am Übergangspunkt von Mode B nach Mode C.

$$\tau_{21,c} = R_{\perp\parallel} \sqrt{1 + 2 \cdot p_{\perp\parallel}^c} \quad (5.12)$$

In der Modellvorstellung werden Faserbruch und Mode-C-Zwischenfaserbruch als kritisch angesehen und können nicht toleriert werden. Beim nahezu gleichzeitigen Versagen einiger Faserbündel unter faserparalleler Zug- oder Druckbeanspruchung werden hohe Energien freigesetzt, die die Umgebung stark zerstören, wobei eine Umlagerung der Spannungen in die benachbarten Schichten oftmals nicht möglich ist. Im Allgemeinen wird Faserbruch daher als Bruchgrenze eines Laminats angesehen [79]. Modus-C-Zwischenfaserbrüche, die überwiegend durch Querdruck- sowie Quer/Längs-Schubspannungen hervorgerufen werden, können aufgrund der sich ausbildenden schrägen Bruchebenen eine Keilwirkung verursachen und das gesamte Laminat schädigen. Allerdings ist nach Puck ([80], [97]) davon auszugehen, dass die Keilwirkung nur bei einer relativ großen Dicke der betroffenen Einzelschicht, großen Bruchwinkel zwischen $\pm 30^\circ$ und $\pm 45^\circ$ und Anstrengungen $f_E \geq 1,25$ verursacht wird. Da die Beurteilung des Modus-C-Zwischenfaserbruchs noch nicht abschließend geklärt ist, wurde in der vorliegenden Arbeit das Eintreten eines Modus-C-Zwischenfaserbruchs bei $f_E = 1$ als kritisch angesetzt.

Unterkritische Modus-A- und Modus-B-Zwischenfaserbrüche führen in multidirektional verstärkten Laminaten nicht unmittelbar zum Totalversagen des Laminats. Derartige Schädigungen können kontinuumsmechanisch durch „Verschmieren“ und globale Steifigkeitsabminderung abgebildet werden, die eng an die Aussagefähigkeit eines Modells zum Rissbeginn gekoppelt sind [79], [80], [87], [88] [99] – [104]. Derartige Modellansätze werden auch als Continuum Damage Model (CDM) bezeichnet [98]. Das Chiu-Modell [103], in dem die korrespondierende Steifigkeit unmittelbar nach Schädigungseintritt vollständig mathematisch unstetig degradiert wird, ist die einfachste Art der Beschreibung des Nachrissverhaltens. Die Vorteile dieses Modells liegen in der einfachen Umsetzbarkeit in Rechenalgorithmen und dem nicht vorhandenen zusätzlichen Aufwand zur experimentellen Kennwertbestimmung. Weiterhin führt diese Vorgehensweise zu einer konservativen Vorhersage, da durch die vorgenommene Steifigkeitsdegradation eine nahezu vollständige Umlagerung der Spannungen in die Nachbarschichten erfolgt.

Für die Übertragung des Degradationsmodells auf die unterkritischen Modus-A- und Modus-B-Zwischenfaserbrüche wurde das Chiu-Modell modifiziert und dem Zwischenfaserbruch-Kriterium von Puck angepasst. Bei Eintritt eines Modus-A-Zwischenfaserbruchs infolge von Querkzugspannungen σ_2 wird ein sich öffnender Riss gebildet, so dass in der Folge weder Schubspannungen τ_{21} noch Quernormalspannungen σ_2 mehr über die Rissufer hinweg übertragen werden können. Aus diesem Grund werden der Elastizitätsmodul E_2 , der Schubmodul G_{21} und die Querkontraktionszahl ν_{21} jeweils durch einen konstanten Faktor d_A abgemindert:

$$\begin{pmatrix} E_{2,\text{deg}} \\ G_{21,\text{deg}} \\ \nu_{21,\text{deg}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{A,E_2} \\ d_{A,G_{21}} \\ d_{A,\nu_{21}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{2T} \\ G_{21T} \\ \nu_{21} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{pmatrix} d_{A,E_2} \\ d_{A,G_{21}} \\ d_{A,\nu_{21}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,03 \\ 0,67 \\ 0,67 \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

Die Größe von d_A hängt vom Mittragen des Werkstoffs zwischen den Rissen ab. Nach Abschluss der sukzessiven Rissbildung und Erreichung der Rissättigung (characteristic damaged state CDS) ist d_A minimal. Aus Versuchen an Probekörpern aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff wurden Werte für die Reststeifigkeit ermittelt ([79], [101] und [104]), welche als Abminderungsfaktoren in Gl. (5.13) einfließen.

Bei Eintritt eines Modus-B-Zwischenfaserbruchs, der durch überlagerte hohe Schub- und relativ niedrige Quer-Druckspannungen τ_{21} , bzw. σ_2 ausgelöst wird, bildet sich aufgrund der Druckspannung ein überdrückter Riss aus, weshalb zur Degradation der Steifigkeitskennwerte die Übertragung von Querdruckspannungen zugelassen, die von Schubspannungen aber weiterhin unterbunden wird. Aus diesen Gründen wird der Schubmodul G_{21} mit $d_{B,G_{21}} = 0,67$ abgemindert. Eine Abminderung von ν_{21} und E_{2T} wird nicht durchgeführt ($d_{B,E_2} = 0$, $d_{B,\nu_{21}} = 0$).

Bei der Durchführung der Festigkeitsanalyse werden folgende Effekte nicht betrachtet, da entweder noch Forschungsbedarf besteht oder deren Einfluss gering ist. Vernachlässigbar bei CFK ist in beanspruchungsgerecht ausgelegten Laminaten der Einfluss der Faserumorientierung infolge der äußeren Belastung, da die Beanspruchungen im Wesentlichen von den Fasern übertragen werden, deren Verformungen aufgrund des hohen Elastizitätsmoduls gering und die resultierenden Winkeländerungen sehr klein sind. Immer noch nicht eindeutig belegt ist der sogenannte In-Situ-Effekt, der versucht die Festigkeit eines UD-Laminats im Vergleich zur Festigkeit einer derartigen Schicht innerhalb eines Mehrschichtverbundes zu quantifizieren.

Dieser Effekt wird maßgeblich von der Einzelschichtdicke bestimmt, weshalb die Festigkeit einer in einem MSV eingebetteten Einzelschicht wesentlich größer sein kann als die Kennwerte, die an UD-Laminaten experimentell gemessen werden [105].

Der Einfluss von Eigenspannungen im Laminat durch Temperatur- und Feuchteinflüsse auf das Totalversagen des MSV ist gering, allerdings wird der Eintritt vom Erstschichtversagen dadurch stark beeinflusst. Insbesondere die Ermittlung und Berücksichtigung von aus der Fertigung in die FKV-Struktur induzierten Eigenspannungen erweist sich als schwierig und die Frage in welcher Höhe diese anzusetzen sind, ist in der Fachwelt umstritten. Übertragbare Ergebnisse liegen hier nicht vor [102]. Innerhalb der nachfolgenden Berechnungen werden daher Eigenspannungen nicht berücksichtigt. Ferner könnte die Versagensanalyse durch eine Berücksichtigung der Änderung des nichtlinearen Spannungs-Verzerrungs-Verhaltens des Werkstoffs in Abhängigkeit des vorliegenden Schichtspannungsverhältnisses bei mehrachsiger Beanspruchung verbessert werden. Dies wurde in [80] bei GFK anhand des $\frac{\tau_{21}}{\sigma_2}$ -Verhältnis gezeigt, wobei die Änderung des Werkstoffverhaltens erst in

Bereichen höherer Schiebung deutlich wurde. Da zu diesem möglichen Effekt noch keine ausreichend abgesicherten Werte vorliegen und in belastungsgerecht ausgelegten Laminaten hohe Schiebungen nicht auftreten, wurde der Einfluss des Schichtspannungsverhältnisses auf das Werkstoffgesetz nicht berücksichtigt.

Das Modell zur schichtenweisen Festigkeitsanalyse wurde in Ansys® mit Hilfe der Ansys® Parametric Design Language (APDL) über ein Makro implementiert, welches nach der Modellerstellung (Geometrie, Vernetzung, Randbedingungen, Belastungen) eingelesen wird. Zur Werkstoffmodellierung werden in einer Eingabemaske die Anfangssteifigkeiten und die Parameter, der an die Spannungs-Verzerrungs-Kurven des zu betrachtenden CFK-Werkstoffs angepassten Ramberg-Osgood Gleichungen, eingegeben. Weiterhin sind die Festigkeiten und Steigungsparameter vorzugeben. Das Makro bietet wahlweise die Möglichkeit, die Berechnung mit linear elastischem oder nichtlinear elastischem Werkstoffverhalten durchzuführen. Weiterhin kann gewählt werden, ob eine Degradation der Steifigkeit nach Eintritt von unterkritischen Bruchmoden vorgenommen werden soll oder nicht. Die Auswertung der Spannungen erfolgt in den Integrationspunkten jeden Elements an der Schichtober- und Schichtunterseite sowie in Schichtmitte, wobei der Evaluierungspunkt mit der höchsten

Werkstoffanstrengung maßgebend ist. Die Berechnung wird beendet, wenn entweder die Genauigkeitsschranke oder eine festzulegende Anzahl an Iterationen erreicht ist. Nach dem Berechnungsvorgang werden die Werkstoffanstrengungen, die Bruchmoden und die geschädigten Bereiche durch das Makro in den Ansys®-Postprozessor zurückgegeben, wo die Ergebnisse grafisch dargestellt werden können.

Die Möglichkeit der vollständigen Festigkeitsanalyse gibt dem Konstrukteur Informationen über die Werkstoffanstrengung in einem FKV-Bauteil unter der gegebenen äußeren Beanspruchung, die Beanspruchungshöhe beim Einsetzen des FPF und die vorliegende Tragfähigkeitsreserve. Im Allgemeinen ist FPF als Belastungsgrenze eines Bauteils anzusehen, insbesondere dann, wenn dieses zyklischen Belastungen unterworfen ist [79]. Unter bestimmten Lastfällen mit einer seltenen Eintrittswahrscheinlichkeit, die den Fahrer aber vor einem Sturz durch Brechen eines Bauteils schützen kann, können Modus-A- oder Modus-B-Zwischenfaserbrüche akzeptiert und LPF als Bemessungsgrenze herangezogen werden, welcher deutlich höher liegen kann, wie bereits in Bild 8 gezeigt wurde.

5.3.2 Verifizierung des Festigkeitsanalysewerkzeugs

Die Vorhersagegüte des Analysewerkzeugs zur vollständigen schichtenweisen Festigkeitsanalyse wurde an zwei Beispielen verifiziert. Hierbei wurde ein auf einer Trommel-Prepreg-Anlage hergestelltes CFK-System aus einem zähmodifiziertem Epoxidharz und einer Hochmodul-Kohlenstofffaser (Mitsubishi HR40) verwendet. Zur Werkstoffcharakterisierung wurden im Heißpressverfahren gefertigte, quadratische FKV-Platten mit den in Tabelle 11 angegebenen Laminatkonfigurationen zur Verfügung gestellt. Die Aushärtung erfolgte bei 140 °C und einer Stunde Aushärtezeit. Die Versuchsdurchführung und Auswertung der verschiedenen Werkstoffprüfungen erfolgte in Anlehnung an die in Tabelle 11 aufgeführten Prüfnormen an Flachprobekörpern.

Tabelle 12 zeigt eine Zusammenfassung der Elastizitäts- und Festigkeitskennwerte des UD-verstärkten HR40-EP. Die an dem CFK-Werkstoff durchgeführten Prüfungen sind in [113] ausführlich dokumentiert. Dargestellt ist jeweils der arithmetische Mittelwert und die einfache Standardabweichung. Der Faservolumengehalt der Platten betrug nach Herstellerangaben 47 %. Überprüfungen des Faservolumengehalts an

Tabelle 11: Versuchsplan zur Ermittlung von Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen der UD-verstärkten HR40-EP Einzelschicht

Laminat-konfiguration	Probekörperdicke [mm]	Belastung (einachsig, $x \equiv 0^\circ$)	Spannungs-Verzerrungs-Beziehung	Probekörperanzahl	Prüfnorm
[0] ₈	1,0	Zug (x)	$\sigma_1^t - \varepsilon_1^t$	5	DIN EN ISO 527
[0] ₃₆	4,1	Zug (y)	$\sigma_2^t - \varepsilon_2^t$	4	DIN EN ISO 2597
[+45/-45] _{s4} [+45/-45]	2,2	Zug (x)	$\tau_{21} - \gamma_{21}$	6	DIN EN ISO 14129
[0] ₁₈	2,1	Druck (y)	$\sigma_1^c - \varepsilon_1^c$	5	DIN EN ISO 14126
[0] ₂₆	3,0	Druck (x)	$\sigma_2^c - \varepsilon_2^c$	5	DIN EN ISO 14126
[0/90/-45/+45] _{s2}	1,7	Zug (x)	$\sigma_x - \varepsilon_x$	4	DIN EN 6038

Tabelle 12: Elastizitäts- und Festigkeitskennwerte der UD-verstärkten HR40-EP-Einzelschicht mit einem Faservolumengehalt von 47 %

Bezeichnung / Formelzeichen	Einheit	Mittel-	1-SA
Zug-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung	E_1^t	[MPa]	5.892
Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung	E_1^c	[MPa]	3.707
Zug-Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung	E_2^t	[MPa]	220
Druck-Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung	E_2^c	[MPa]	492
Schubmodul in der Schichtebene	G_{21}	[MPa]	195
Querkontraktionszahl	ν_{21}	[1]	0,086
Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung	R_{\parallel}^t	[MPa]	111
Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung	R_{\parallel}^c	[MPa]	78
Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung	R_{\perp}^t	[MPa]	4
Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung	R_{\perp}^c	[MPa]	6
Schubfestigkeit in der Schichtebene*	$R_{\perp\parallel}$	[MPa]	5
Zugbruchdehnung parallel zur Faserrichtung	$\varepsilon_{1,ult}^t$	[1]	0,0006
Druckbruchdehnung parallel zur Faserrichtung	$\varepsilon_{1,ult}^c$	[1]	0,0006
Zugbruchdehnung quer zur Faserrichtung	$\varepsilon_{2,ult}^t$	[1]	0,0006
Druckbruchdehnung quer zur Faserrichtung	$\varepsilon_{2,ult}^c$	[1]	0,0017

*Spannung bei einer Schiebung $\gamma_{21} = 5 \%$

Schliffproben mit dem Auflichtmikroskop bestätigten diesen Wert mit Ausnahme der Platte zur Ermittlung der $\sigma_1^c - \varepsilon_1^c$ -Beziehung. Diese wies einen Faservolumengehalt von 52 % auf, was der Grund für den deutlich höheren Druck-Elastizitätsmodul im Vergleich zu E_1^t ist. Die ermittelten Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen wurden durch die modifizierte Ramberg-Osgood-Funktion nach Gl. (5.1) beschrieben, die Bestimmung der Anpassungsparameter erfolgte iterativ nach [95]. Die auf diese Weise ermittelten Parameter können Tabelle 13 entnommen werden. Anhand der experimentell ermittelten Ergebnisse konnten die $(\sigma_1^t - \varepsilon_1^t)$ - und die $(\sigma_2^t - \varepsilon_2^t)$ -Beziehungen mit sehr guter Näherung als linear angesehen werden.

Zur Beurteilung der Vorhersagegüte des entwickelten Festigkeitsanalysewerkzeugs wurden Flachproben mit einem quasi-isotropen Laminataufbau experimentell geprüft und mit der Vorhersage des Festigkeitsanalysewerkzeugs verglichen. Die Vorhersage erfolgte unter Verwendung eines linearen ($\xi_p = 0$) und eines nichtlinearen Werkstoffmodells. Wie in Bild 31 dargestellt, stimmt der Verlauf der experimentell ermittelten $\sigma_x^t - \varepsilon_x^t$ -Kurven sehr gut mit den rechnerischen Vorhersagen überein.

Tabelle 14 zeigt den Vergleich zwischen der experimentell und rechnerisch ermittelten Zugfestigkeit $R_{x,LPF}^t$ und der Zugbruchdehnung ε_x^t . Bei den experimentell ermittelten Kenngrößen sind jeweils der arithmetische Mittelwert und die einfache Standardabweichung angegeben. Schließlich wird bei den rechnerisch ermittelten Kenngrößen zusätzlich die Spannung $R_{x,FPF}^t$ bei FPF aufgeführt. Auffällig ist, dass das Werkstoffmodell unabhängig davon, ob linear oder nichtlinear, einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Zugfestigkeit $R_{x,LPF}^t$, die Zugbruchdehnung ε_x^t und das Erstsichtversagen $R_{x,FPF}^t$ hat. Beide rechnerisch ermittelten Ergebnisse stimmen gut mit dem Experiment überein und liegen innerhalb des Streubands mit einfacher Standardabweichung. Die rechnerischen Ergebnisse liegen sowohl bei $R_{x,LPF}^t$ als auch bei ε_x^t konservativ unterhalb der jeweiligen Mittelwerte des Experiments, was durch die Vernachlässigung des Mittragens der Matrix zwischen den eigentlichen Rissen vor dem CDS erklärt werden kann. Die wesentlichen Gründe für die geringen Unterschiede zwischen dem linearen und dem nichtlinearen Werkstoffmodell liegen in der Laminatkonfiguration und der niedrigen Bruchdehnung der verwendeten Hochmodulkohlenstofffaser. Durch die quasi-isotrope Laminatkonfiguration werden die Span-

nungen über die Fasern abgetragen, was zu einer geringen Bruchdehnung des Laminats führt. Dadurch prägen sich die vorhandenen werkstofflichen Nichtlinearitäten,

Tabelle 13: Parameter der modifizierten Ramberg-Osgood Gleichungen zur Beschreibung der werkstofflichen Nichtlinearitäten in den $(\sigma - \varepsilon)$ -Beziehungen des betrachteten CFK-Werkstoffs [113]

$(\sigma - \varepsilon)$	E_0 [MPa]	ξ_p [1]	σ_p [MPa]	e [1]
$\sigma_1^t - \varepsilon_1^t$	149.716	0	-	1
$\sigma_1^c - \varepsilon_1^c$	166.376	0,0001	684	6
$\sigma_2^t - \varepsilon_2^t$	7.014	0	-	1
$\sigma_2^c - \varepsilon_2^c$	8.832	0,005	140	3,5
$\tau_{21} - \gamma_{21}$	3.238	0,016	63	7

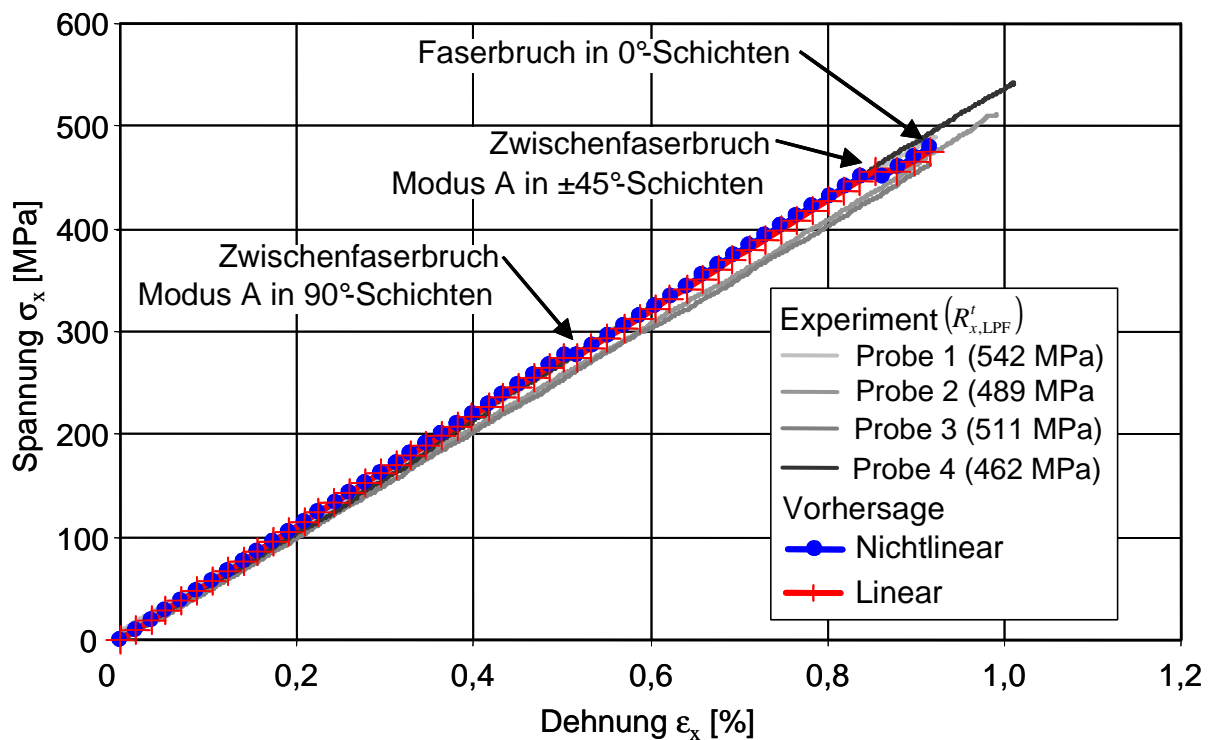


Bild 31: Experimentell und rechnerisch ermittelte $(\sigma_x - \varepsilon_x)$ -Verläufe eines $[0/90/-45/+45]_{s2}$ HR40-EP-Laminats unter zügiger einachsiger Zugbelastung bis zum Totalversagen [113]

wie sie überwiegend in den höheren Verzerrungsbereichen der matrixdominierten $(\sigma_2^c - \varepsilon_2^c)$ - und $(\tau_{21} - \gamma_{21})$ -Beziehungen der Einzelschicht vorliegen, nicht aus. Weiterhin sinkt mit zunehmendem Zugelastizitätsmodul der Faser der Einfluss der Schichten an der Laminatsteifigkeit, deren Faserorientierung nicht in Beanspruchungsrichtung verläuft. Bild 32 zeigt das zur Dimensionierung verwendete FE-Modell eines Fahrradrahmens unter einer statischen Frontallast und die zugehörige quantitative Darstellung der Verformungsfigur sowie die Modellierung des Steuerkopfs. Das Rahmenmodell besteht aus ca. 46.000 Schalenelementen vom Typ Shell99 sowie ca. 7.000 Volumenelementen vom Typ Solid95. Die verwendeten Elemente verfügen über quadratische Verschiebungsansätze. Die Lamine der einzelnen Rohre und die Anbindungslamine wurden durch geschichtete Schalenelemente modelliert. Die Klebung, die eine Hohlkehle in der Fügung ausbildet, wurde durch Volumenelemente abgebildet. Als Vernetzungsflächen für die Schalenelemente wurden die Rohrmittelflächen sowie die Mittelflächen der Anbindungslamine verwendet. Zu den Grundlaminaten der Hauptrohre werden in hoch beanspruchten Bereichen zusätzliche Verstärkungslagen eingebracht, wie beispielsweise auf der Unterseite des Unterrohres. Im Bereich der Fügung von Ober- und Unterrohr mit dem Steuerkopf überlappen die Anbindungslamine, weshalb dort 19 verschiedene Laminatkonfigurationen abgebildet werden müssen.

Simuliert wird das Aufstellen des Hauptrahmens, wie es bei einem Bremsvorgang oder einem Frontalstoß geschieht. Am Tretlager greift eine Kraft F an, während das

Tabelle 14: Rechnerisch ermittelte Festigkeit $R_{x,FPF}^t$ bei Erstsichtversagen sowie experimentell und rechnerisch ermittelte Festigkeit $R_{x,LPF}^t$, Zugbruchdehnung ε_x^t eines quasi-isotropen $[0/90/-45/+45]_{S2}$ -Laminats aus HR40-EP und Darstellung des Einflusses der werkstofflichen Nichtlinearität

	$R_{x,FPF}^t$	$R_{x,LPF}^t$		Zugbruchdehnung ε_x^t	
	[MPa]	Mittelwert [MPa]	1 SA [MPa]	Mittelwert [%]	1 SA [%]
Experiment	-	501	35	0,96	0,05
nichtlineare Rechnung	276	477	-	0,92	-
lineare Rechnung	276	475	-	0,92	-

System an der Vorder- und Hinterachse gelagert ist. Die Verformungsfigur zeigt, dass sich das Ober- und Unterrohr aufgrund des großen Biegemoments, das am Steuerkopf eingeleitet wird, nach oben wölbt. Die höchst beanspruchten Bereiche sind dementsprechend die Ober- und Unterseiten des Ober- und Unterrohres im Bereich des Steuerkopfs. Aufgrund der geringeren Druckfestigkeit parallel zur Faserichtung im Vergleich zur Zugfestigkeit sind die druckbeaufschlagten Unterseiten des Ober- und Unterrohres höher gefährdet. Um die hohe Werkstoffanstrengung in diesem Bereich zu verringern, wurden im unteren Bereich des Unterrohres bereits Verstärkungsschichten eingebracht.

Bild 33 a) zeigt einen durch Faserdruckbruch auf der Unterseite des Unterrohres zerstörten Rahmen, der auf dem in Bild 51 dargestellten Prüfstand gemäß dem Lastfall aus Bild 32 statisch getestet wurde. Der Bruch trat bei einer Kraft $F_{\text{Frontal}} = 3,2 \text{ kN}$ am Ende der Verstärkungsschichten ein. Mit der Vorhersage wird der gleiche Versagensort und Bruchtyp ermittelt, dagegen liegt die Bruchkraft mit $F = 3,9 \text{ kN}$ etwa 22 % oberhalb des Messwerts des Experiments. Die Gründe für die Abweichung in der Bruchkraft liegen überwiegend im Werkstoff und in Fertigungseinflüssen begründet. Die Druckfestigkeit R_{\parallel}^c weist eine einfache Standardabweichung von 10 % auf. Weiterhin weichen die FVG um bis zu 5 % von der Herstellerangabe ab. Die Fertigung der Rahmen erfolgt mit einem hohen Anteil an Handarbeit und den damit verbundenen Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Prepreg-Zuschnitte und der Einhaltung der Faserorientierungen. Hinzu kommen leichte Schwankungen in der Laminatdicke durch das Schlauchaufblasverfahren.

Unter Berücksichtigung der Einflussparameter erscheint das Vorhersageergebnis daher zufrieden stellend. Entsprechend sollte in der Dimensionierung den Abweichungen in den Werkstoffkennwerten und den Fertigungseinflüssen durch Sicherheitsfaktoren Rechnung getragen werden. An dem entwickelten und angewendeten Modell zur Festigkeitsanalyse konnte gezeigt werden, dass die verwendeten Ansätze für den anwendungsnahen Einsatz an komplexen Strukturen ausreichend sind.

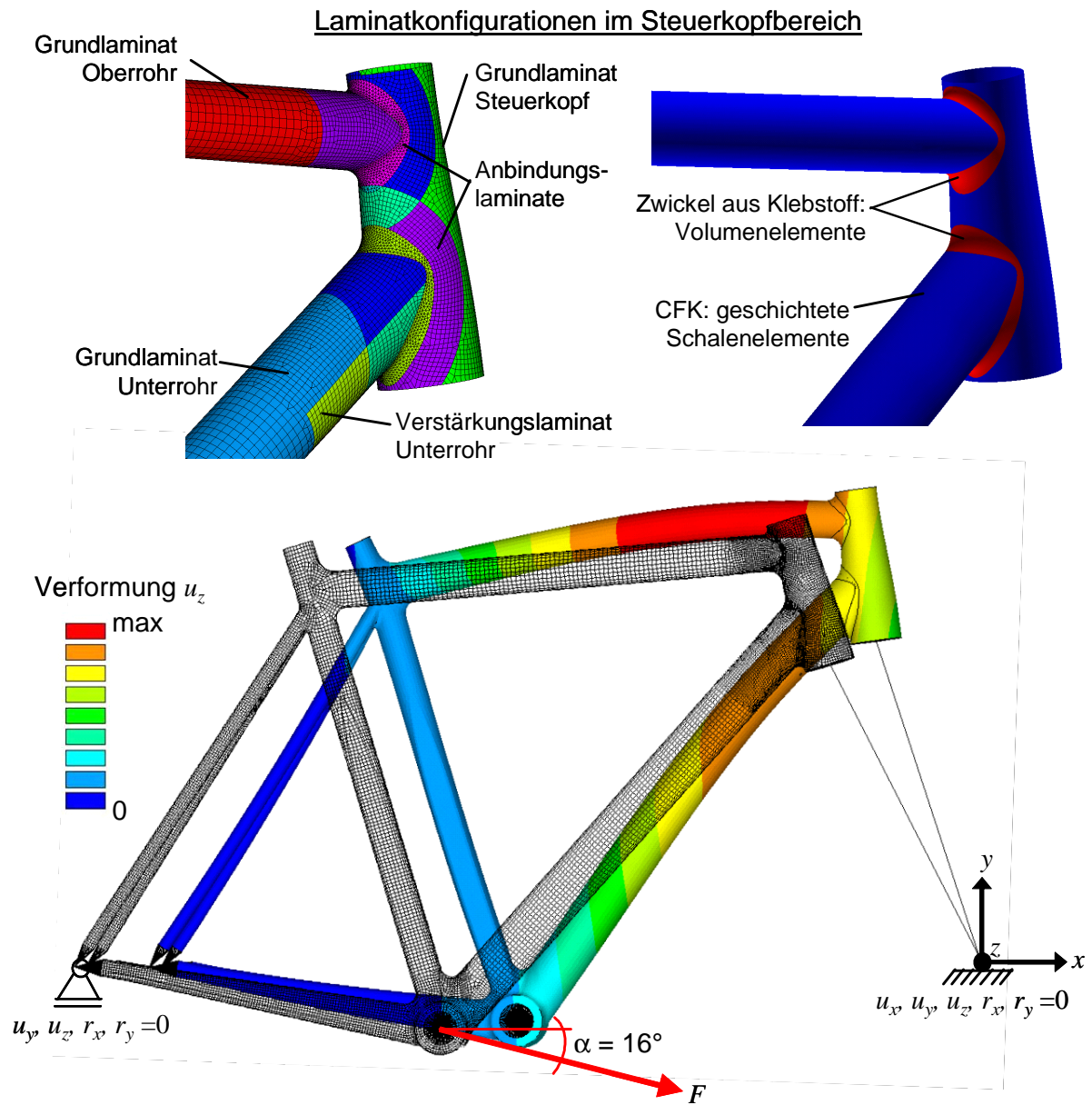


Bild 32: Statisches System des Rahmens unter Frontallast F mit Detaildarstellung der FE-Modellierung der Grund- und Verstärkungslaminat im Steuerkopfbereich

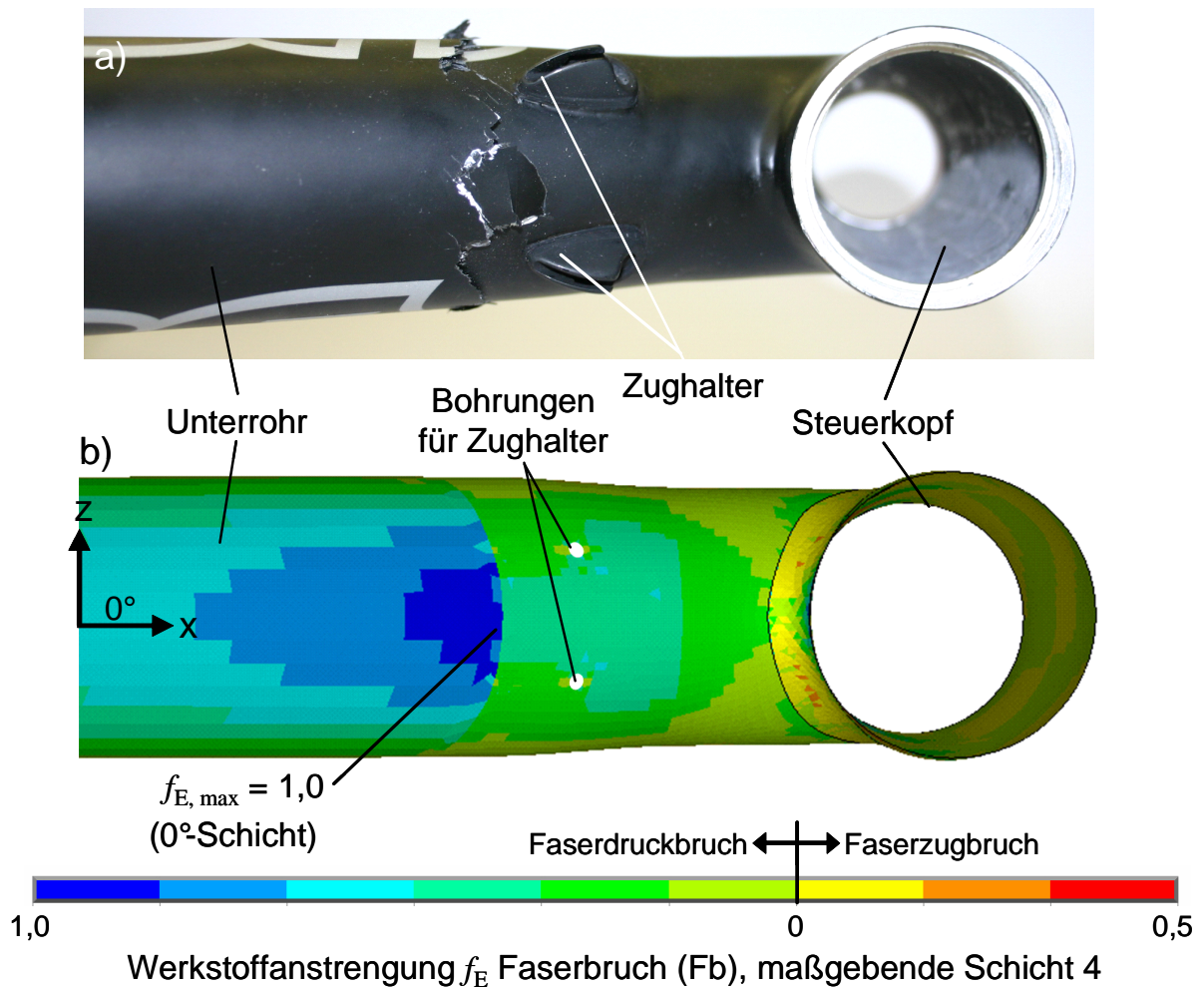


Bild 33: Experiment und rechnerische Anstrengungsbewertung bei einer Bruchkraft F , experimentell $F = 3,2$ kN und rechnerisch $F = 3,9$ kN

6 Rahmenentwicklungen und Ergebnisse

Die Anforderungen an eine geringe Masse und hohe Steifigkeit sind bei Hochleistungs-Rahmen für den professionellen Renneinsatz sehr hoch. Daher stellen diese ideale Bauteile für die Verwendung von CFK dar. Gemeinsam mit der Fa. Canyon Bicycles GmbH, Koblenz, wurde ein Hochleistungs-Rennradrahmen, Canyon Ultimate F10 (F10), entwickelt, das in Bild 3 dargestellt ist. Die Vordimensionierung und Optimierung des Rahmens erfolgte mit den in Kapitel 5 entwickelten Simulationswerkzeugen. Mit OpTop erfolgte die Rahmengestaltung in Abhängigkeit von den Steifigkeitsanforderungen und Bereitstellung eines Ausgangsdesigns für das weitere Vorgehen. Die Laminatkonfigurationen in den Einzelstrukturen wurden mit OpLam optimiert, womit schließlich aus den gewonnenen Erkenntnissen der Rahmen konstruiert wurde. In anschließenden Festigkeitsberechnungen konnten Orte hoher Werkstoffanstrengung detektiert und durch lokale Verstärkungen eine Homogenisierung in der Werkstoffanstrengung erreicht werden. Die den Rahmen bildenden Einzelstrukturen des in Differentialbauweise gefertigten Rahmens sind in Bild 10 dargestellt. Durch die gewählte Bauweise können verschiedene Rahmengrößen aus wenigen Einzelstrukturen mit geringen Werkzeugkosten gefertigt werden. Die Einzelstrukturen werden aus UD-Prepreg im Schlauchaufblasverfahren gefertigt, die mit Hilfe von nachträglich auf die Fügestelle aufgebrachten Anbindungslaminaten gefügt werden. Zur Befestigung der lasttragenden Komponenten, wie Tretlagergewindebuchse, Ausfallenden und Lagereinsätze, wurden Klebeverbindungen gewählt, dagegen Kleinteile wie Zughalter, Umwerfersockel und Flaschenhalter, die nur geringen Beanspruchungen unterliegen genietet (Bild 5).

Auch wenn eine hohe Leichtbaugüte (Steifigkeit / Gewicht) ein wesentliches Ziel der Optimierungsarbeiten war, stellt dies allerdings nicht die Alltagstauglichkeit sicher. Daher bestand die primäre Anforderung an den Rahmen darin, eine ausreichende Betriebssicherheit zu gewährleisten. Hierüber geben insbesondere praktische Fahrversuche und experimentelle Prüfungen Aufschluss. Aus diesem Grund wurden frühzeitig mehrere Rennräder aufgebaut, die im Wechsel mit verschiedenen Fahrern mit unterschiedlichem Fahrstil und Gewicht mehrere Tausend Testkilometer schadfrei zurücklegten. Hierbei wurde das Rennradchassis auch bewusst auf naheliegenden Missbrauch, wie Sprünge, Durchfahren von Schlaglöchern, schnelles Überfahren von Kopfsteinpflaster oder Überfahren von Bordsteinkanten, getestet. Neben den

praktischen Fahrversuchen wurde die Haltbarkeit des entwickelten Rennradchassis unter statischer, zyklischer und kurzzeitdynamischer Belastung auf verschiedenen Prüfständen nachgewiesen.

Bild 34 zeigt den Vergleich von CFK-RR-Chassis mit führenden, auf dem Markt erhältlichen Chassis aus Aluminium zum Zeitpunkt der Markteinführung des F10 [114] – [119]. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden die Chassisgewichte mit definierten Anbauteilen ermittelt, weiterhin beziehen sich die Ergebnisse auf die Rahmengröße 57. Lag für diesen Vergleich kein Rahmen in dieser Größe vor, so wurde die nächst größere oder kleinere Größe gewählt und das Gewicht über einen Korrekturfaktor kalibriert. Der Vergleich beinhaltet zwei wesentliche, für die Fahreigenschaften charakteristischen Steifigkeitswerte C_{TL} und C_{LK} . Die Darstellung erfolgt jeweils in Form der Steifigkeit-zu-Rahmengewicht-Verhältnisse $STW-C_{TL}$ und $STW-C_{LK}$, aufgetragen über das RR-Chassisgewicht m_{RC} .

In den Diagrammen ist beim RR-Chassisgewicht m_{RC} eine Unterscheidung der Werkstoffe offensichtlich. Der arithmetische Mittelwert der RR-Chassisgewichte liegt bei den Al-Rahmen bei 1981 ± 266 g und damit um etwa 20 % höher als bei den CFK-Rahmen mit 1579 ± 210 g. Der arithmetische Mittelwert für $STW-C_{TL}$ liegt bei Al bei $68,3$ Nm/%kg mit einer einfachen Standardabweichung von $6,5$ Nm/%kg, wohingegen bei CFK $85,0 \pm 13$ Nm/%kg erreicht werden. Die mittlere Leichtbaugüte bezüglich C_{TL} ist unter Verwendung von CFK gegenüber Al um 25 % höher. Demgegenüber zeigt der Vergleich für $STW-C_{LK}$ eine mittlere Verbesserung um 9 % bei CFK (CFK $63,9 \pm 16,4$ Nm/%kg, Al $58,8 \pm 7,0$ Nm/%kg). Bei der Betrachtung der Diagramme in Bild 34 wird deutlich, dass CFK hinsichtlich des STW-Verhältnisses Vorteile bieten kann, eine Vielzahl der CFK-Rahmen aufgrund unzureichender Dimensionierung keine Verbesserung gegenüber den Al-Rahmen darstellen.

Dies äußert sich auch in der fast doppelt so hohen Standardabweichung in den Mittelwerten der CFK Rahmen im Vergleich zu den Al-Rahmen. Das Potenzial von CFK zeigt sich eindrucksvoll beim F10-Rahmen mit einem Chassisgewicht m_{RC} von 1.329 g bei einem $STW-C_{LK}$ von $100,3$ Nm/%kg und einem $STW-C_{TL}$ von $129,0$ Nm/%kg. Der RR-Rahmen F10 wird seit 2005 kommerziell vertrieben. Inzwischen wurden schätzungsweise mehr als 10 Mio. km darauf zurückgelegt, der Rahmen wird sowohl im Breitensport als auch im professionellen Rennbetrieb genutzt.

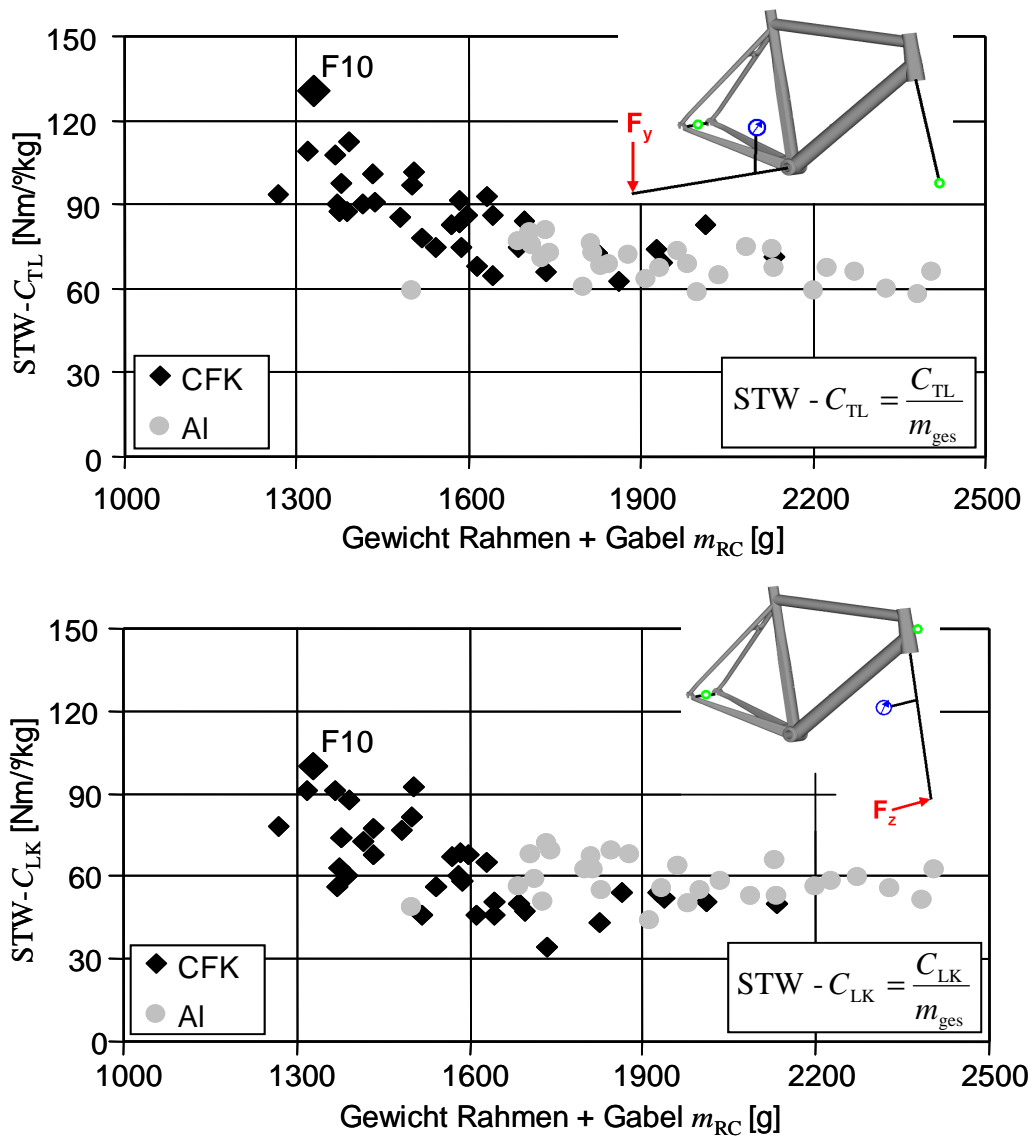


Bild 34: Leichtbaugüte der führenden CFK- und Al-Rennradrahmen [114] – [119] und des Canyon Carbon Ultimate F10 (F10)

Basierend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der RR-Rahmenentwicklung wurden mit der gleichen Vorgehensweise und Bauweise ein ungefederter CFK-Hardtailingrahmen (CF Ultimate F10) mit einem Rahmengewicht von 1.150 g und ein CFK-Hauptrahmen eines gefederten MTB-Rahmens mit einer Viergelenk-Hinterbaukinematik (Spectral F10) mit einem Gewicht von 950 g entwickelt. Bild 34 und Bild 35 zeigt die beiden MTB-Rahmen. Sowohl das CF Ultimate F10 als auch das Spectral F10 erreichten in Vergleichstests mit den führenden MTB-Rahmen aus CFK und Al aus der gleichen Kategorie Höchstwerte [120], [121].



Bild 35: Vollgefedertes Canyon-Spectral-F10-Mountainbike mit CFK-Hauptrahmen



Bild 36: Hardtail Mountainbike Canyon CF Ultimate F10 mit CFK-Rahmen

7 Transversale Stoßeinwirkung auf Fahrradrahmen

Neben vielfältigen Vorzügen von FKV-Werkstoffen gibt es auch werkstoffspezifische Besonderheiten, welche bei der Dimensionierung zu beachten sind. Zu diesen zählt eine im Vergleich zu Metallen geringe Toleranz gegenüber senkrecht zur Oberfläche einwirkende Stoßbelastungen (Impakt). Ein derartiger Stoß ruft in einem duktilen Werkstoff überwiegend plastische Verformungen hervor, während FKV mit duroplastischer Matrix vergleichsweise spröde mit Rissbildung auf diese Belastungsform reagieren [98]. Übersichten über experimentelle Untersuchungen zu transversalen Stoßbeanspruchungen wurden von Abrate ([122], [123]) und von Cantwell und Morton [124] zusammengetragen. Die dabei im Werkstoff ablaufenden Mechanismen sind äußerst komplex und noch weitestgehend unerforscht. Dennoch ist charakteristisch, dass der FKV-Werkstoff bei einer gering eingebrachten Schlagbeanspruchung einem gewissen Schädigungsverlauf folgt. Hierbei kommt es im Wesentlichen aufgrund der geringen Zugfestigkeit quer zur Faser zu Zwischenfaserbruch, die sich in Laminatdickenrichtung ausbreiten, wohingegen benachbarte Schichten mit anderer Faserorientierung als Rissstopperschichten wirken. Aufgrund des hohen Steifigkeits­sprungs an den Riss­spitzen folgt ein interlaminares Schadenswachstum in Form flächiger Trennung benachbarter Schichten (Delamination). Neben dem Delaminationswachstum bilden sich aufgrund der fehlenden Stützwirkung der Nachbarschichten neue intralaminare Risse senkrecht zu den Delaminationen aus [98].

Bei geringen Schlagenergien wird die Energie bei CFK-Werkstoffen daher im Wesentlichen durch die Bildung von Matrixrissen und Delaminationen dissipiert, während bei dünnwandigen Bauteilen aus metallischen Werkstoffen nach außen hin sichtbare Schäden in Form von Beulen verbleiben. Insbesondere bei den im Rahmenbau verwendeten schwarzen Kohlenstofffasern sind Schäden im Laminat visuell schwer detektierbar, wohingegen diese in transparenten GFK-Laminaten in Form von Trübungen gut erkennbar sind [39]. Bei höheren Energien werden Faserbrüche oder translaminare Risse gebildet, die über mehrere Schichten verlaufen.

Die Faserbrüche treten bevorzugt auf der dem Schlag entgegen gesetzten Seite auf [98] und sind bei geschlossenen Rohrquerschnitten daher oftmals nicht einsehbar. Beispielsweise zeigt Bild 37 eine lichtmikroskopische Aufnahme eines CFK-MSV in

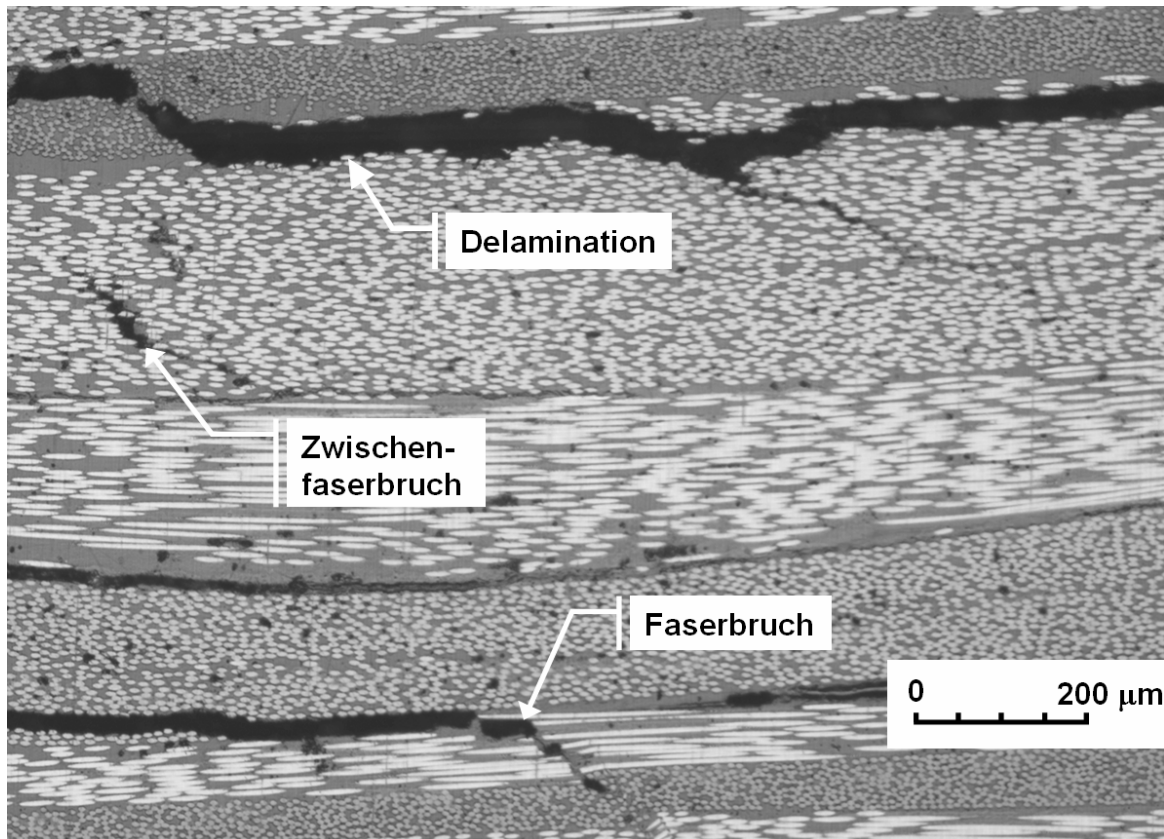


Bild 37: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Mehrschichtverbunds aus kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz nach Impaktbelastung mit typischen Schädigungsformen

Dickenrichtung nach einer Schlagbeanspruchung, in der Delaminationen, Zwischenfaserbrüche und Faserbrüche deutlich erkennbar sind. Die Impakteigenschaften von rohrförmigen Strukturen aus CFK nach Stoßeinwirkung hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab. Zu diesen zählen die Faser-, Matrix-, und Grenzflächeneigenschaften, der Faservolumengehalt, die Faserarchitektur, die Laminatkonfiguration, die Wanddicke, der Rohrquerschnitt, die Form des Impaktors sowie die Masse und Aufprallgeschwindigkeit.

Typische Beeinträchtigung der Beanspruchbarkeit nach einer geringeren Stoßbelastung ist eine Reduktion der Knick- oder Beulstabilität durch die Verminderung des Biege-E-Moduls aufgrund von Schichtentrennung. Weiterhin können Delaminationen unter zyklischer Belastung anwachsen, wenn der Risswiderstand, der maßgeblich durch die Zähigkeit der Matrix und die Qualität der Faser/Matrix-Haftung bestimmt ist, nicht ausreicht, um das Risswachstum zu stoppen. Die durch Stoßeinwirkung

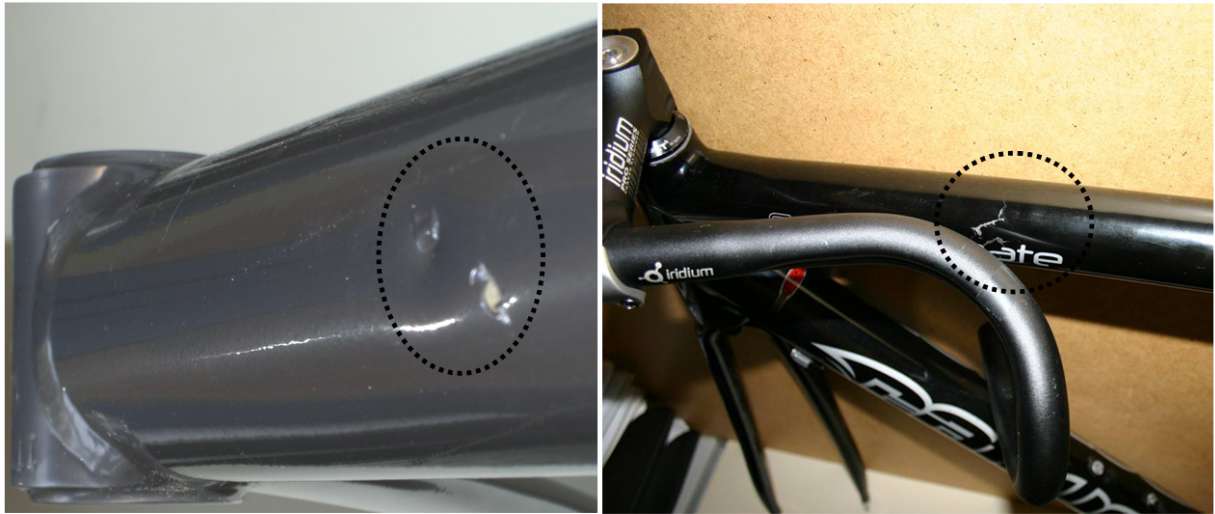


Bild 38: Schäden an Rennradrahmen, hervorgerufen durch transversale Stoßbeanspruchungen a) Beule im Unterrohr eines Aluminiumrahmens durch Steinerschlag, b) visuell erkennbarer Riss in der Oberfläche im Oberrohr eines CFK-Rahmens durch Lenkereinschlag bei einem schweren Sturz



Bild 39: Übliche impactgefährdete Bereiche eines Fahrradrahmens

hervorgerufenen Zwischenfaserbrüche, führen wegen der Spannungskonzentration an den Rissspitzen oftmals zur Bildung von Delaminationen. Faserbrüche deuten dagegen auf hohe Impaktbelastungen und auf eine schwerwiegende Zerstörung des Laminats hin, wodurch die vorherrschenden äußeren Belastungen auf den intakten Umgebungsbereich umgelagert werden müssen.

Transversale Stoßeinwirkungen auf Fahrradrahmen treten im normalen Betrieb oder durch naheliegenden Fehlgebrauch auf. Bild 39 zeigt anschaulich die üblichen impaktgefährdeten Bereiche an einem Fahrradrahmen. Zu den kritischen Bereichen eines Rahmens gehört die Unterseite des Unterrohrs, wo durch den Vorderreifen aufgewirbelte Steine auftreffen können. Weiterhin ist der mittlere Bereich des Oberrohrs durch das Einschlagen des Lenkers oder des Brems/Schalthebels bei einem Sturz gefährdet. Schließlich kann der Rahmen durch Unachtsamkeit beim Abstellen des Fahrrades gegen eine Kante fallen. Bild 38 zeigt Schäden an RR-Rahmen, die durch Steinschlag sowie Lenkereinschlag nach einem Sturz hervorgerufen wurden. Auf dem Markt befindliche Hochleistungs-Rahmen mit dünnen Wanddicken sind gegenüber solchen Beanspruchungen besonders gefährdet.

7.1 Versuche zur Simulation des Umfallens von Rennrädern

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, treten an Fahrradrahmen die verschiedensten Stoßeinwirkungen auf. Innerhalb des Stands der Technik im Rahmenbau, wie in Kapitel 2 aufgeführt, wird der Nachweis der Impaktbeständigkeit gegen transversale Stoßbelastung nicht gefordert, weshalb es auch keine Hinweise zur Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung gibt. Hier ist es daher notwendig, andere Anwendungsgebiete in die Überlegungen mit einzubeziehen.

In der Werkstoffwissenschaft werden überwiegend Prüfungen für Impaktbeständigkeit an ebenen Probeplatten durchgeführt, die durch einen kugelförmigen Impaktor mit einem Durchmesser von 16 oder 20 mm und punktförmiger Berührungsfläche geschädigt werden. Standard sind der Kugelfallversuch nach DIN 52306, Durchstoßprüfungen nach DIN EN ISO 6603, die Bestimmung der Restdruckfestigkeit nach einem Impakt die DIN 65561, DIN EN 6038, ASTM D 7136/D 7136 M, ASTM D 7137/D 7137 M sowie nach Werknormen von Airbus AITM 1-0010 und Boeing BSS 7260. In Anlehnung an die Standards werden in den nachfolgend be

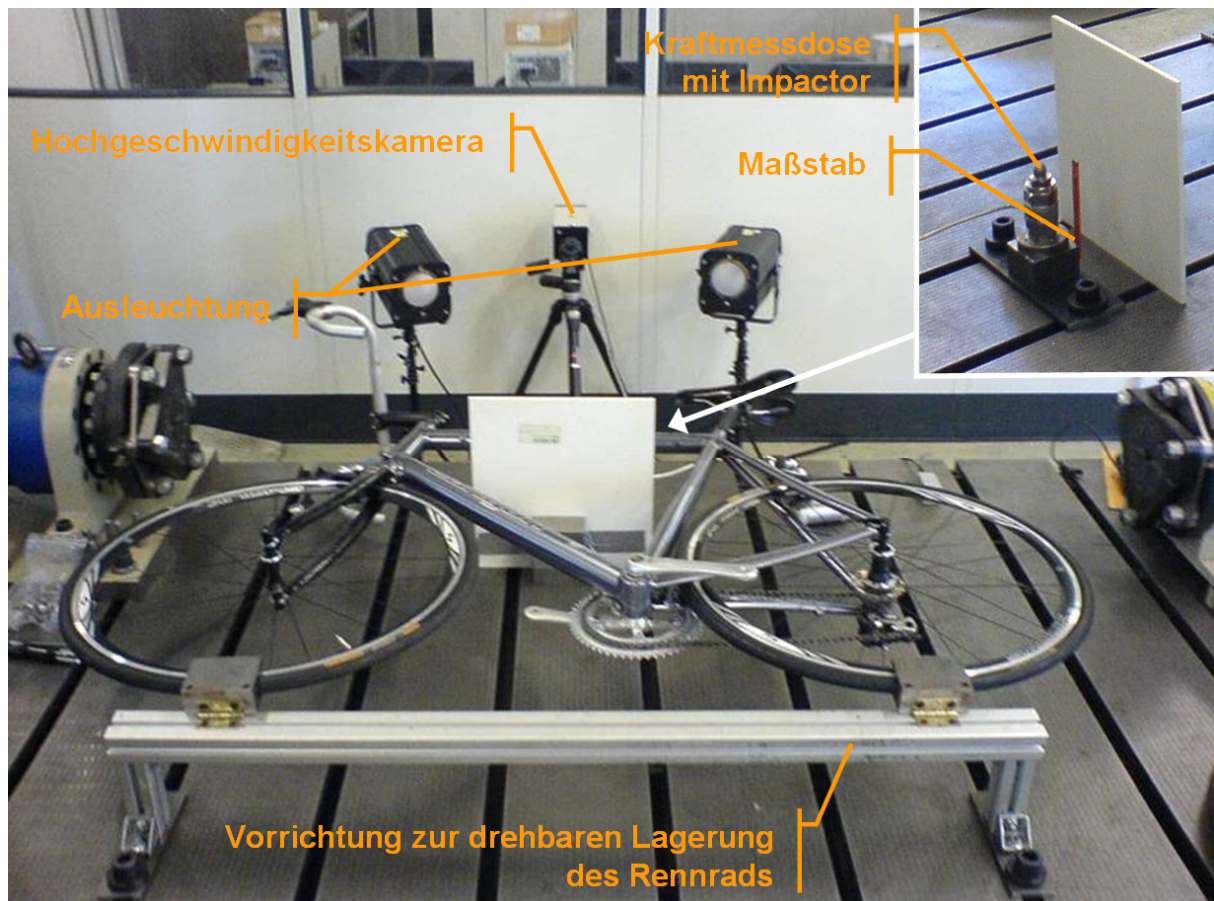


Bild 40: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Impaktenergie E_{Imp} bei einem Sturz eines Rennrades mit optischer Verformungsaufnahme

schriebenen Untersuchungen kugelförmige Impaktoren mit einem Durchmesser von 20 mm verwendet. Maßgebend für die Versuchsdurchführung ist die Kenntnis der maximal auftretenden Stoßenergie E_{Imp} . Da hierzu keine Informationen vorliegen, wurde ein Versuchsstand zur Ermittlung der maximalen Stoßenergie beim Umfallen eines Fahrrades aufgebaut (Bild 40). Hierzu wurde das RR in der Achse durch die Radaufstandspunkte drehbar in einer auf dem Spannfeld des IVW befestigten Führungsschiene gelagert. Die Fallversuche wurden sowohl aus einer stehenden als auch aus einer schrägen Position (Fall um 90° bzw. 45°) durchgeführt, wobei das RR mittig mit dem Oberrohr auf den Impaktor fiel.

Der Impaktor war auf einer piezoelektrischen Kraftmessdose der Firma Kistler Typ 9331B montiert. Der Versuch wurde über eine Hochgeschwindigkeitskamera (Fa. Redlake MotionPro HS3) mit einer Aufnahmefrequenz von 2000 Bildern/Sekunde aufgezeichnet, wobei durch ein hinter dem Impaktor aufgebrachtes Messgitter das Eindringen des Impaktors in das Rohr optisch verfolgt und ausgewertet werden kann.

te. Über einen manuell ausgelösten Trigger wurde die Aufzeichnung des elektrisch verstärkten Signals der Kraftmessdose und die Hochgeschwindigkeitskamera gestartet. Die Daten wurden zeitsynchron an einen PC weitergeleitet und mit einer am IVW entwickelten Auswertesoftware in LabView® aufbereitet und ausgewertet.

Die Kraft-Weg-Kurve wird aus den gemessenen Stoßkraft-Zeit- und Verformungs-Zeit-Kurven ermittelt. Die Stoßenergie E_{Imp} berechnet sich aus dem Integral der Kraft-Weg-Kurve im endlichen Intervall zwischen der ersten Berührung (s_0) des Impaktors mit der Rohroberfläche bis zur maximalen Eindringtiefe s_{max} .

$$E_{\text{Imp}} = \int_{s_0}^{s_{\text{max}}} F_{\text{Imp}} \cdot ds \quad (6.1)$$

Ausgehend von einer in aufsteigender Reihenfolge sortierten Folge von Messpunkten i (Stützstellen), kann die Fläche unter der Funktionskurve durch numerische Integration mit Hilfe der einfachen Sehnen-Trapezregel unter Annahme eines stückweise linearen Verlaufs wie folgt ermittelt werden:

$$E_{\text{Imp}} = \int_{s_0}^{s_{\text{max}}} F_{\text{Imp}} \cdot ds = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (F_{\text{Imp},i} + F_{\text{Imp},i-1}) \cdot (s_i - s_{i-1}) \quad \text{für } i = 1 \text{ bis } n \text{ Stützstellen} \quad (6.2)$$

Insgesamt wurden jeweils zwei RR mit Al- und CFK-Rahmen geprüft. Die wichtigsten Merkmale der RR mit Al-Rahmen sind in Tabelle 15 aufgeführt. Bild 41, links, zeigt die Beschädigung am Oberrohr eines Al-Rahmens, Bild 41, rechts, die an einem CFK-Rahmen nach dem Sturz aus schräger Position im Laborversuch.



Bild 41: Beschädigung an Oberrohren von Rennradrahmen aus Aluminium, links, und aus CFK, rechts, nach Fall um 45° auf einen Impaktor mit einem Durchmesser von 20 mm

Tabelle 15: Merkmale der geprüften Al-Rennräder zur Ermittlung der maximalen Stoßenergie bei einem Sturz

Modell	Canyon F8
Baujahr	2005
Rahmenwerkstoff	Al 7005 T6
Rahmengröße	50 cm
RR-Gewicht	8 kg
Oberrohrdurchmesser	42 mm
Wanddicke des Oberrohrs im Bereich des Impakts	0,7 mm

Die Rahmen wiesen schwerwiegende Schäden auf, die eine weitere Benutzung nicht mehr erlaubten. Die Ergebnisse beider CFK-Rahmen konnten für die Auswertung nicht weiterverwendet werden, da der Impaktor die Wandung des Oberrohrs durchschlug und die maximale Eindringtiefe nicht ermittelt werden konnte. Bild 42 zeigt die

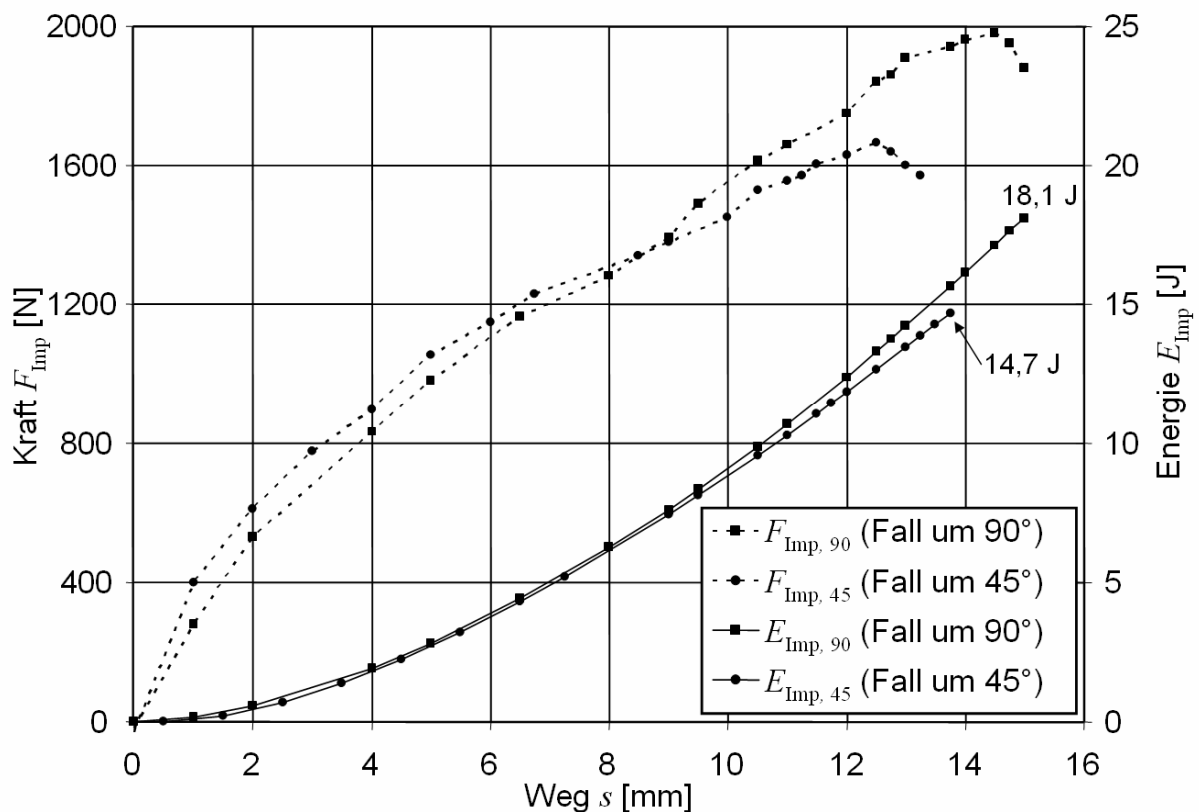


Bild 42: Kraft-Weg- und daraus berechnete Energie-Weg-Verläufe von Aluminiumrahmen bei einem Fall um 45° und 90°

Kraft-Weg- und die Energie-Weg-Verläufe der beiden getesteten RR aus Aluminium. Die Kraft-Weg-Verläufe weisen eine leichte Degression auf, mit zunehmender Eindringtiefe des Impaktors wird der Verlauf unregelmäßiger. Bei beiden Kurven fällt das Kraftmaximum nicht mit dem Wegmaximum zusammen. Die resultierenden Energiestoßverläufe weisen eine sehr gute Übereinstimmung bis etwa 10 J auf, darüber weichen sie geringfügig voneinander ab. Aus den Versuchen ergeben sich eine maximale Stoßenergie von $E_{\text{Imp},90} = 18,1 \text{ J}$ für einen Fall um 90° und $E_{\text{Imp},45} = 14,7 \text{ J}$ bei einem Fall um 45° . Innerhalb der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei einem Fall um 90° ohne weiteres Stoßenergien in Höhe von bis zu 18 J auftreten können, wobei bereits bei einem Fall um 45° an den geprüften Al- und CFK-Rahmen die entstandenen Schäden eine weitere Benutzung ausschlossen.

7.2 Schäden an Rohrprobekörpern durch Stoßeinwirkung

Aus den gewonnenen Erkenntnissen über auftretende Stoßenergien bei einem Fall eines RR ergeben sich Fragestellungen hinsichtlich der Impaktbeständigkeit für den Alltagsgebrauch von Hochleistungs-Rahmen. Von Interesse ist die Impaktenergie, die schadfrei von einem Rahmen, hier insbesondere von Ober- und Unterrohr, ertragen werden kann. Weiterhin ist die Kenntnis der Höhe der Stoßenergie von Bedeutung, die erste Schäden verursacht. Da es sich bei den Nutzern um Nichtfachleute handelt, die in der Regel keine technischen Hilfsmittel zur Schadenserkennung verwenden können, ist die visuelle Inspektion die einfachste Möglichkeit der Schadenserkennung. Schließlich ist das Schadensausmaß von Bedeutung, das eine weitere Nutzung ausschließt.

Aufgrund der Komplexität und der Kosten ist es nicht zielführend, Komplettträder zu untersuchen. Vielmehr ist es sinnvoll, diese Fragestellungen nach dem Impaktverhalten an Substrukturen zu studieren. Als Substrukturen wurden repräsentative Al- und CFK-Ober- und Unterrohre ausgewählt, die in Tabelle 16 angegeben sind. Auf eine Lackierung der Rohre wurde verzichtet, um einen besseren visuellen Eindruck über die Schäden zu erhalten. Die Al-Rohre wurden im Strangpressverfahren aus einer Zink-Magnesium-Legierung (7005) hergestellt und einer T6-Wärmebehandlung unterzogen. Die CFK-Rohre werden aus vom Hersteller selbst angefertigten Prepregs im Schlauchaufblasverfahren durch Heißpressen gefertigt.

Als Faserwerkstoffe kamen eine Hochmodul- und eine Intermediate-Modulus-Kohlenstofffaser (HR40, Fa. Mitsubishi bzw. IM600 Fa. Toho-Tenax) zum Einsatz.

Beide Fasern sind nach Aussage des Herstellers mit dem gleichen leicht zähmodifizierten Epoxidharz imprägniert. Die Faser IM600 besitzt eine Zugfestigkeit von $R_f^t = 5.790$ MPa und eine Bruchdehnung von $\varepsilon_{f,ult}^t = 2,0$ % gegenüber der Faser HR40 mit einer Zugfestigkeit $R_f^t = 4.610$ MPa und einer Bruchdehnung von $\varepsilon_{f,ult}^t = 1,2$ %.

Bild 43 zeigt die Vorrichtung, in der die Rohrprobekörper befestigt wurden. Die aus Al gefertigte Einspannvorrichtung besteht aus einer Grundplatte mit verschiedenen Bohrungen zur Montage auf dem Pendelprüfstand und der am IVW vorhandenen Fallturmanlage. Zwei zueinander verschiebbare Lagerböcke dienen zur Einstellung der Stützweite. Ein über jedem Lagerbock einstellbarer Querriegel fixiert das Rohr in der Halterung. Die Auflageflächen der Lagerböcke sind dreiecksförmig ausgeführt, so dass Rohre mit einem Durchmesser von 15 mm bis 60 mm gelagert werden können. Der lichte Abstand der Lagerböcke wurde nach Vorversuchen auf 100 mm festgelegt. Dieser hatte sich mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen als minimaler Abstand herausgestellt, um eine Beeinflussung der auftretenden Schädigungen und Verformungen der Rohre durch die Lagerschalen auszuschließen. Durch den so gewählten Lagerabstand konnten an einem Rohr bis zu acht Impaktprüfungen durchgeführt werden. Zur Stoßprüfung wurde die Einspannvorrichtung auf einem Spanntisch befestigt. Als Schlagmasse diente ein Metallstab mit einem Gewinde, an den verschiedene Impaktorformen aufgeschraubt werden konnten und der mit

Tabelle 16: Rohrkonfigurationen zur Durchführung von Stoßversuchen

Konfiguration	Werkstoff	Spezifikation	Rohrtyp	Durchmesser [mm]	Soll-Wanddicke [mm]
A	Al	7005	Unterrohr	55	0,7
B	Al	7005	Unterrohr	55	1,2
C	Al	7005	Oberrohr	42	0,7
D	CFK	HR40-EP*	Oberrohr**	42	1,0
E	CFK	IM600-EP*	Oberrohr**	42	1,0
F	CFK + 3M***	HR40-EP*	Unterrohr*	56	1,2 + 0,3

* Laminatkonfiguration [+45/-45/0/0/+45/-45/0/0/+22,5/-22,5/-45/+45] (Herstellerangaben)
 ** Laminatkonfiguration [+45/-45/0/0/+22,5/-22,5/0/0/-45/+45] (Herstellerangaben)
 */** FVG = 47 %, Epoxidharztyp unbekannt
 *** Schutzfilm Scotchgard™ PU 8591E (3M™)

masselosen Fäden, wie in Bild 44 dargestellt, aufgehängt wurde. Neben einzelnen Rohren kann auch ein kompletter Rahmen in die Vorrichtung eingespannt werden. Durch die gegebene Raumhöhe ist die Fallhöhe der Schlagmasse auf 2,3 m begrenzt. Das Pendel wurde nach dem ersten Impact aufgefangen, um Mehrfachstöße auf den Probekörper zu unterbinden. Am Pendel wurde ein einaxialer kapazitiver Miniaturbeschleunigungsaufnehmer mit einem Messbereich von bis zu $\pm 5000 \text{ m/s}^2$ befestigt. Die ermittelten Beschleunigungswerte während der Versuchsdurchführung wurden an einen PC weitergeleitet und mit Hilfe der Software MSYS (Fa. Maul-Theet Systeme) verarbeitet und ausgewertet. Die Masse des Metallstabs einschließlich des Beschleunigungssensors betrug 0,67 kg, wodurch der mittlere Bereich des möglichen Spektrums interessanter Impaktenergien in Höhe von 0,5 J bis 10 J zur Simulation von Steinschlag und Fallvorgängen eines Rades abgedeckt werden können. Aus der maximalen Beschleunigung b_{\max} und der Kenntnis der Impaktormasse m_{Imp} lässt sich die maximale Kraft F_{\max} nach Gl. (6.3) ermitteln. Bild 45 zeigt nochmals den

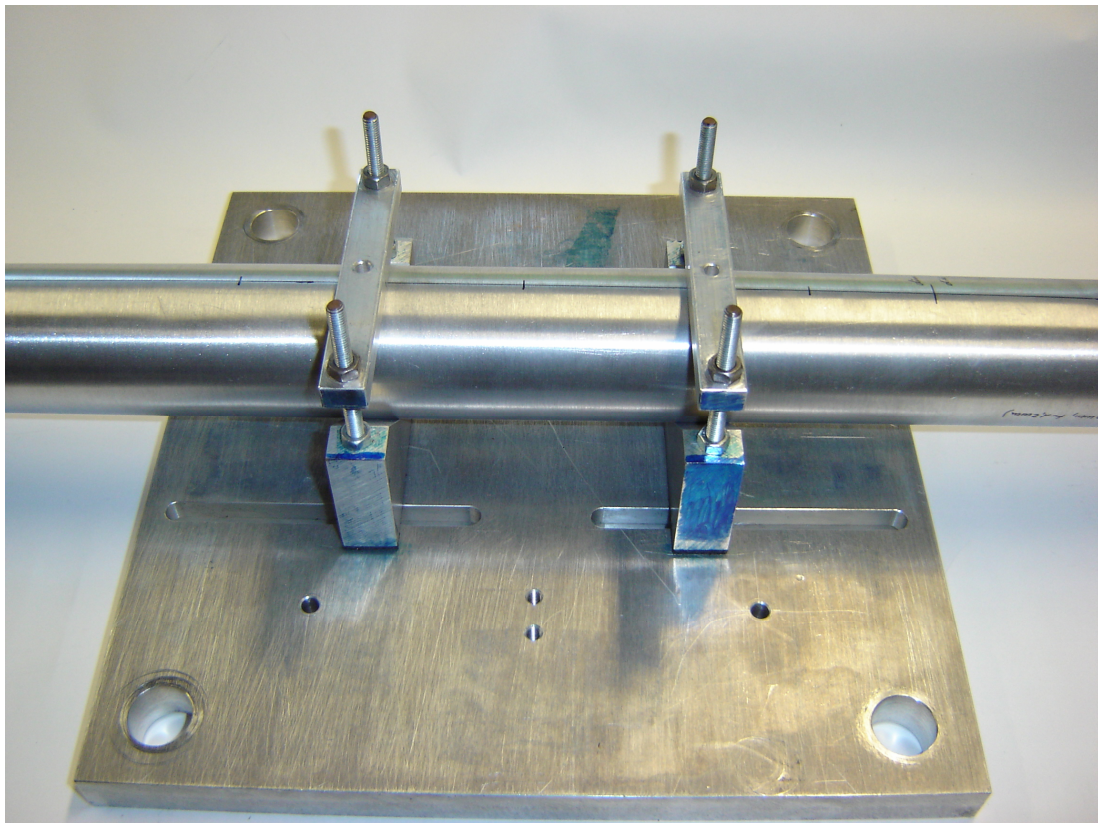


Bild 43: Einspannvorrichtung zur Rohrprobenbefestigung

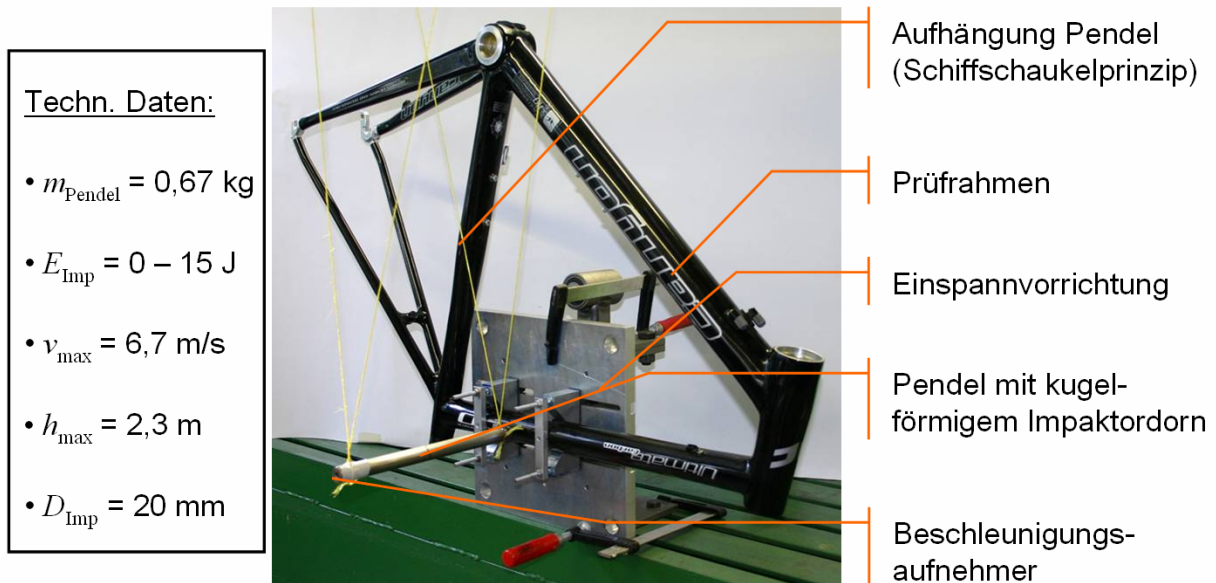


Bild 44: Pendelversuchsanlage zur Durchführung der Impactprüfungen

Zusammenhang zwischen der Impaktormasse, der Impaktorgeschwindigkeit und der daraus resultierenden kinetischen Energie.

$$F_{\text{max}} = m_{\text{Imp}} \cdot b_{\text{max}} \quad (6.3)$$

Anhand von Vorversuchen an CFK- und Al-Rohrprobekörpern konnte festgestellt werden, dass eine Stoßenergie von 10 J erhebliche Schäden hervorruft, so dass

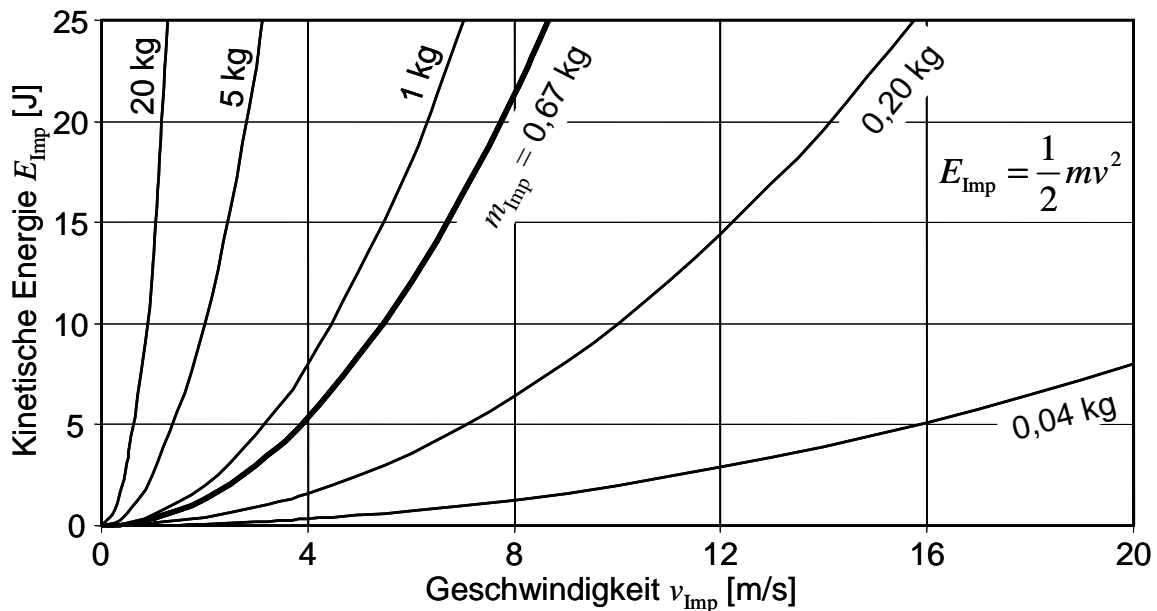


Bild 45: Einfluss der Geschwindigkeit und der Masse auf die kinetische Energie und Darstellung der Impaktormasse m_{Imp} des Pendelprüfstands

Tabelle 17: Abstufung der Stoßenergien E_{imp} im Bereich von 0,5 bis 10 J

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E_{imp} [J]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0

diese als oberer Grenzwert verwendet wurde. Jede Rohrkonfiguration wurde zweimal mit den in Tabelle 17 aufgeführten Stoßenergien beansprucht. Zur Schädigungsbeurteilung kamen neben der visuellen Inspektion Weißlichtprofilometer- und Lichtmikroskopuntersuchungen zum Einsatz. Das Weißlichtprofilometer (MicroProf Standard, Firma Fries Research & Technology GmbH) ermöglicht die Erfassung der Oberflächentopographie mittels fokussiertem Weißlicht. Mit dem Gerät können Risse in der Oberfläche detektiert und Vertiefungen mit einer Genauigkeit von $0,1 \mu\text{m}$ vermessen werden. Bild 46 zeigt ein typisches Oberflächenprofil mit dem Weißlichtprofilometer an einem Aluminiumrohr, das einer transversalen Stoßbeanspruchung durch einen kugelförmigen Impaktor ausgesetzt wurde.

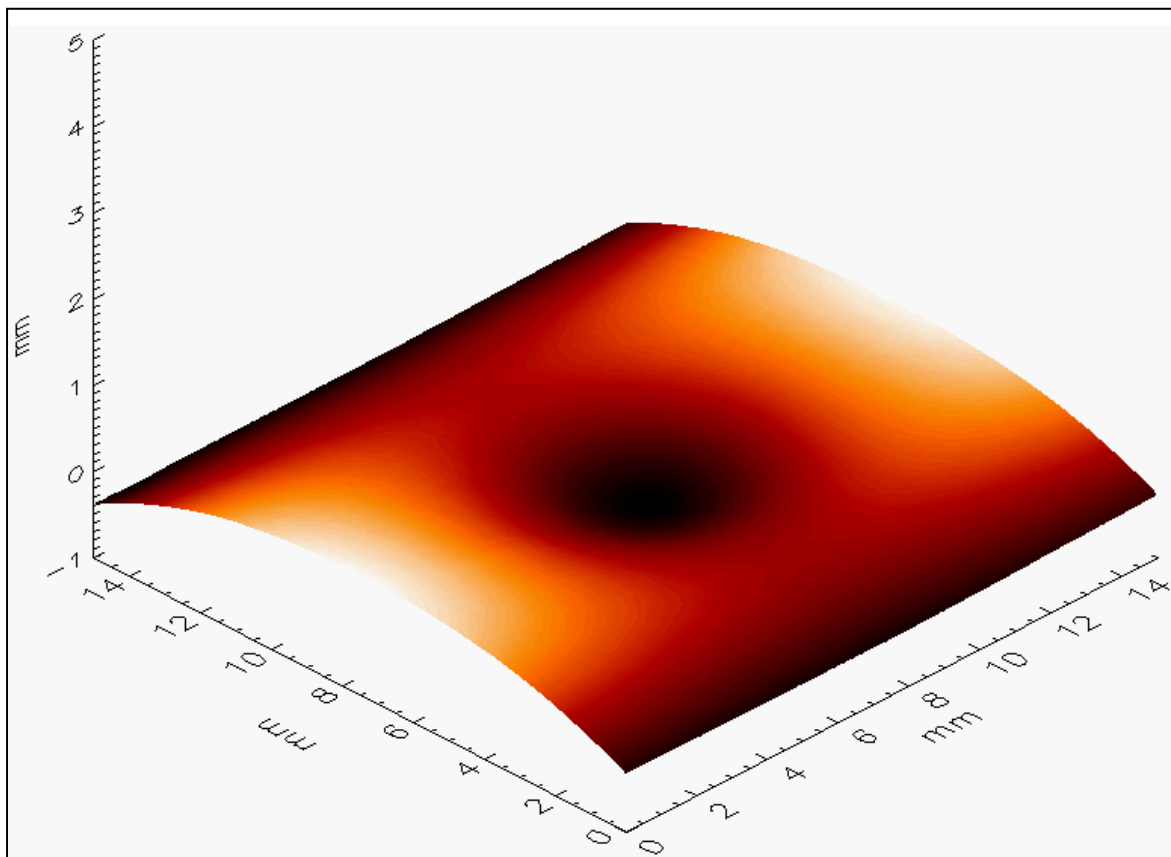


Bild 46: Oberflächenprofil einer durch transversale Stoßbeanspruchung hervorgerufenen Vertiefung in einem Al-Rohr

Zur Analyse der Schädigungsformen in den CFK-Laminaten wurden Untersuchungen an Querschnitten durch die Schichtdicke mit dem Lichtmikroskop (Leitz Aristomet) im Auflichtverfahren durchgeführt. Zur Präparation wurde zunächst der Probekörper um den Bereich des Impakts großräumig mit einem diamantbesetzten Sägeblatt ausgesägt und in ein kalt aushärtendes Harz (Epofix™) eingebettet. Nach dem Aushärten wurde der Schnitt durch den vom Impaktor getroffenen Bereich hergestellt und der verbleibende Probekörper nochmals in Epofix eingebettet. Diese Vorgehensweise stellte sicher, dass die Probe durch den Sägeprozess so wenig wie möglich beeinträchtigt worden ist.

Rohrkonfigurationen A bis C

Die Auswertung der Schadensmuster an den Al-Rohren (Konfigurationen A bis C) zeigte, dass bereits bei der niedrigsten Impaktenergie von 0,5 J kleine, visuelle erkennbare Beulen verursacht wurden, deren Größe bei höheren Energien zunahm. Bei $E_{\text{Imp}}=10$ J waren schwerwiegende Schäden zu erkennen. Die Beulgröße spiegelt die absorbierte Energie durch plastische Verformung wieder. In Bild 47 sind für die Konfigurationen A–C die Maximalkraft F_{Imp} und die Eindringtiefe w_{Imp} über der Impaktenergie E_{Imp} dargestellt. Weiterhin ist der Impaktschaden für Konfiguration A nach Stoßbelastung mit einer Energie von 1 und 10 J abgebildet. Sowohl die Maximalkraft als auch die Eindringtiefe verhalten sich innerhalb dieses Bereiches degressiv. Die bei den Konfigurationen A bis C beobachteten Maximalkräfte weichen wenig voneinander ab und wachsen bei 10 J auf eine Höhe von etwa 1.000 N an. Konfiguration A weist die geringsten Eindringtiefen über dem beobachteten Energiebereich auf, die im Vergleich zur Konfiguration B mit der größeren Wanddicke (1,2 mm gegenüber 0,7 mm) im Mittel über alle Messwerte um 60 % niedriger ausfällt. Daraus folgt, dass die höhere Biegesteifigkeit in Rohrumfangsrichtung zu einer größeren lokalen Energieabsorption durch lokale plastische Verformung führt. Die gleiche Tendenz zeigt sich beim Vergleich der Rohrkonfigurationen A und C. Beide Konfigurationen weisen zwar die gleiche Wanddicke auf, das Oberrohr hat wegen des kleineren Durchmessers eine größere Krümmung als das Unterrohr, was zu einer erhöhten Umfangs

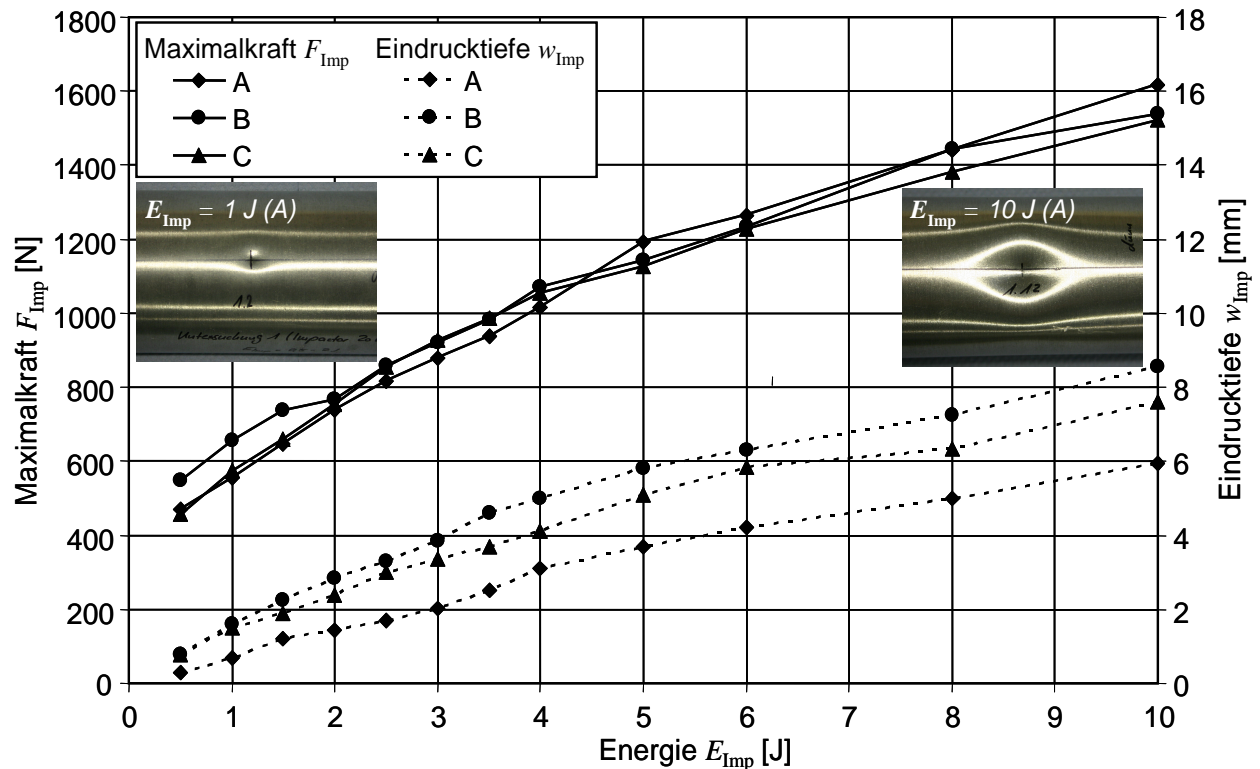


Bild 47: Maximalkraft F_{Imp} und Eindrucktiefe w_{Imp} in Abhängigkeit der Impaktenergie E_{Imp} im Bereich von 0,5 bis 10 J für Al-Rohrkonfigurationen A bis C (Impaktdurchmesser 20 mm)

steifigkeit führt. Dadurch kann nur ein geringerer Anteil der Impaktenergie E_{Imp} als elastische Verformung gespeichert werden, sodass die verbleibende Eindrucktiefe über dem gesamten Energiebereich höher ist. Diese Tendenz wurde von Ehrlich [98] beobachtet, der Untersuchungen über das Impaktverhalten schwach gekrümmter FKV-Platten durchgeführt hatte.

Rohrkonfigurationen D und E

Im Gegensatz zu Aluminium ist das Schädigungsverhalten der CFK-Rohre durch die Inhomogenität und Anisotropie der eingesetzten Werkstoffe komplexer. In Bild 48 ist der Verlauf der Maximalkraft über der Impaktenergie der Rohrkonfigurationen D und E dargestellt, in denen deutliche Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf zu erkennen sind. Die zugehörigen Schliffbilder bei $E_{\text{Imp}} = 0,5$ J und Aufnahmen bei $E_{\text{Imp}} = 8$ J können Bild 49 entnommen werden. Die Auswertung der Schliffbilder zeigte, dass an allen untersuchten Proben ab einer Impaktenergie von 0,5 J Zwischenfaserbrüche und Delaminationen erzeugt werden. Eine auf der Außenseite visuell erkennbare Schädigung in Form eines Faserbruchs tritt bei Rohrkonfiguration D ab 1 J und bei

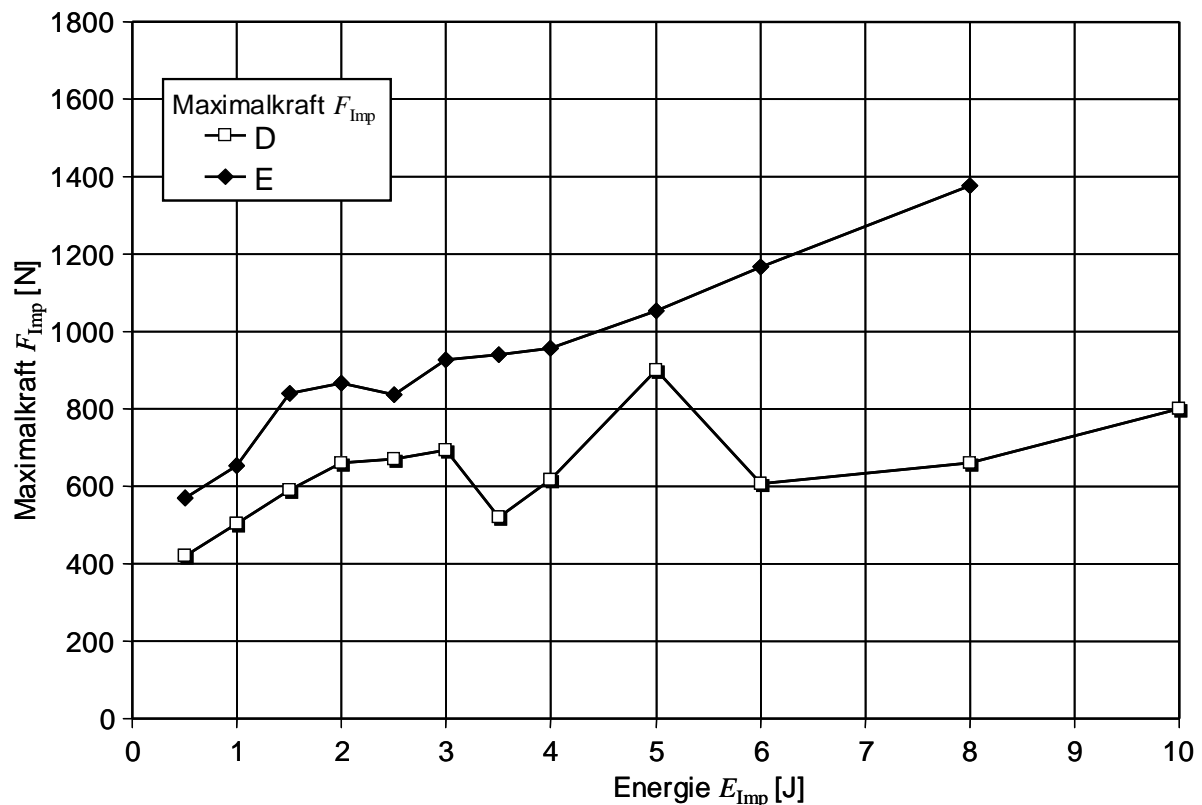


Bild 48: Maximalkraft F_{Imp} in Abhängigkeit der Impaktenergien E_{Imp} für CFK-Rohrkonfigurationen D und E (Impaktordurchmesser 20 mm)

Konfiguration E ab 2,0 J auf. Ab 6 J ist das Laminat bei Rohrkonfiguration D stark geschädigt und der Impaktor durchstößt die Rohrwandung. Im Unterschied hierzu widersteht das Laminat der Rohrkonfiguration E auch Impaktenergien bis 10 J, ohne dass der Impaktor das Laminat durchschlägt oder eine deutliche Zunahme der visuell erkennbaren Schäden ersichtlich ist. Aus den durchgeführten Untersuchungen wird deutlich, dass bei der kleinsten geprüften Stoßenergie Schädigungen in Form von Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen auftreten und kein signifikanter Einfluss des verwendeten Fasertyps erkennbar ist. Bei höheren Energien weisen die Laminate der Konfiguration E, deren Faser eine höhere Zugfestigkeit und eine deutlich höhere Bruchdehnung besitzt ein deutlich geringeres Schädigungsausmaß auf.

Die Gründe für die Unstetigkeiten der Kurvenverläufe in Bild 48 sind auf Schwankungen im Wanddickenverlauf aufgrund von Fertigungseinflüssen zurückzuführen. Die im Schlauchaufblasverfahren hergestellten Rohre wiesen Abweichungen in der Wanddicke von bis zu 10 % vom Soll-Wert auf. Weiterhin ist zu vermuten, dass der

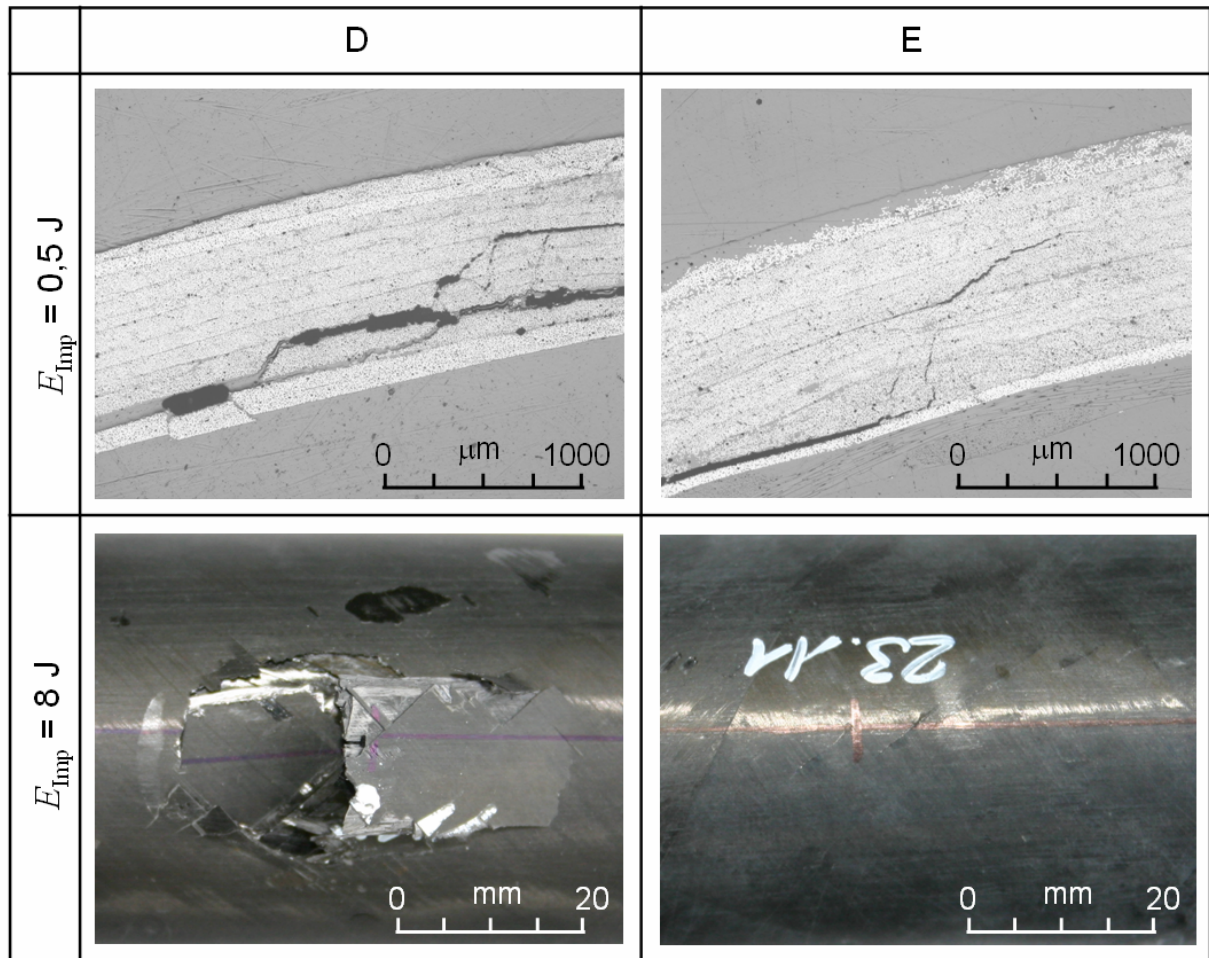


Bild 49: Einfluss des Fasertyps auf das Schädigungsverhalten, Rohrkonfigurationen D (HR40-EP) und E (IM600-EP)

komplexe Schädigungsverlauf durch Zwischenfaserbrüche, Delamination und Faserbrüche wesentlich zu den Unstetigkeiten im Kurvenverlauf beiträgt.

Rohrkonfiguration F

Schließlich wurden Unterrohre der Konfiguration F mit und ohne aufgeklebten Polyurethan-Schutzfilm (Typ Scotchgard™ PU 8591E, 3M™) [133] geprüft. Der Schutzfilm mit einer Dicke von ca. 0,4 mm wird von Herstellern häufig auf kritische Orte des Rahmens aufgeklebt, um diesen vor Steinschlag und Lackschäden zu schützen. Die Untersuchungen zeigten, dass der Schutzfilm keinen signifikanten Einfluss auf die Schädigungsausprägung im Laminatinneren hat. In beiden Fällen sind Delaminationen selbst bei der geringsten Impaktenergie $E_{\text{Imp}} = 0,5 \text{ J}$ erkennbar. Auch treten in beiden Fällen bei $E_{\text{Imp}} = 1,0 \text{ J}$ erste von außen sichtbare Faserbrüche auf.

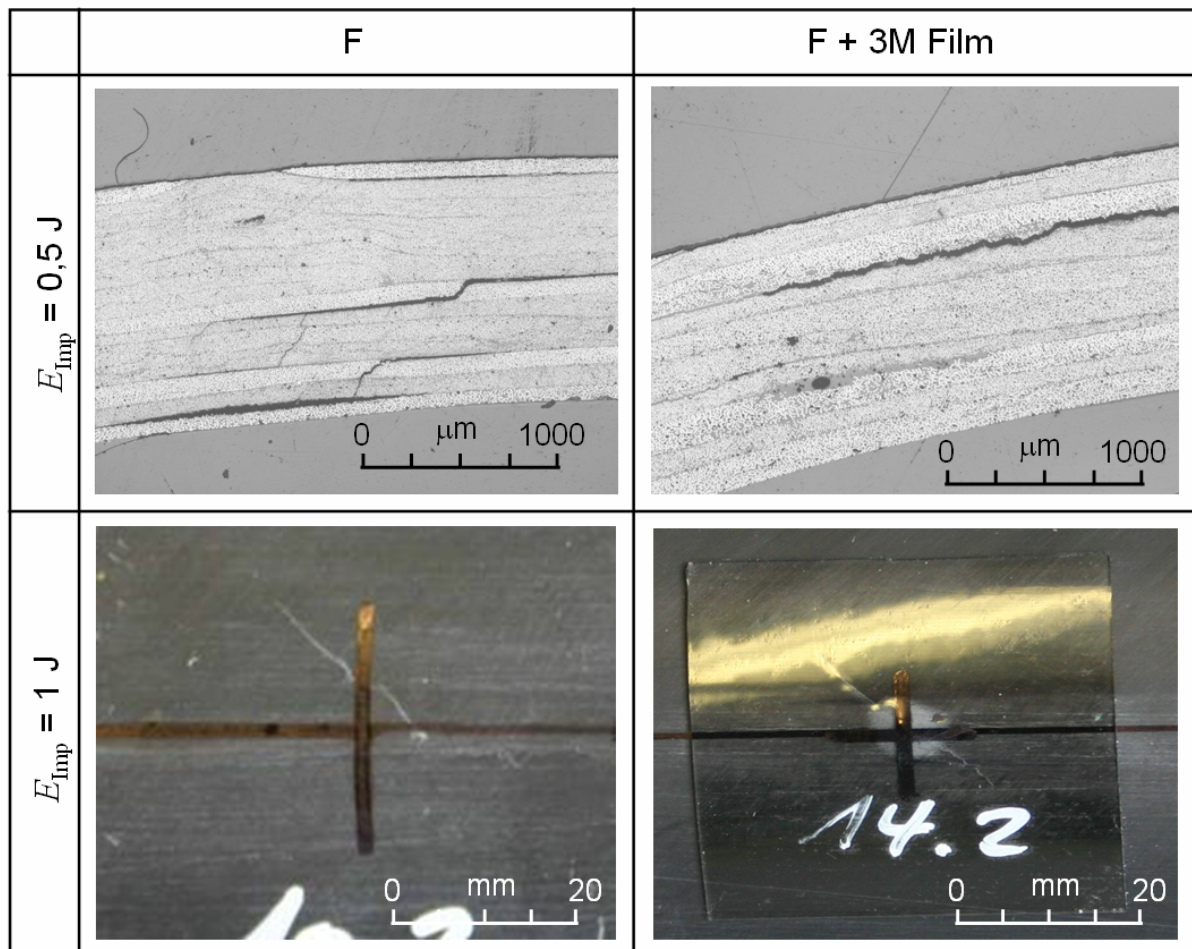


Bild 50: Schädigung an den Rohrkonfigurationen F mit und ohne Schutzfilm Scotchgard™ PU 8591E nach Stoßeinwirkung

Weitere durchgeführte Versuche an lackierten Rohren zeigten jedoch, dass der Schutzfilm sehr gute Dienste als Lackschutz leistet.

7.3 Einfluss von Impaktsschäden auf die Lebensdauer

Die Prüfungen an den Rohrprobekörpern ergaben, dass an dünnwandigen Aluminiumrohren bereits bei kleinsten Impaktenergien Schädigungen in Form von Beulen sichtbar sind. Die Eindringtiefe stieg mit zunehmender Energie stetig an. Die Rohrkrümmung ist für die verbleibende Eindringtiefe mit entscheidend. Beim Vergleich von Unterrohren mit unterschiedlicher Wanddicke konnten größere bleibende Eindrücke als bei dem Rohr mit der höheren Wanddicke festgestellt werden. Die Maximalkraft war bei allen drei untersuchten Rohrsystemen ähnlich. An den untersuchten CFK-Rohren konnten bei allen untersuchten Probekörpern bei der niedrigsten Energiestufe mit 0,5 J innere Schäden durch Delaminationen und Zwischenfaserbrüche

detektiert werden. Diese waren unabhängig von dem verwendeten Fasertyp oder dem Aufbringen eines PU-Schutzfilms. Je nach verwendetem Fasertyp traten visuell erkennbare Faserbrüche bei Energien zwischen 1 und 2 J auf. Dagegen hat der Fasertyp bei Energien im Bereich von 3 bis 10 J einen deutlichen Einfluss auf das Schädigungsausmaß, das sich mit steigender Faserzugbruchdehnung erheblich verringert.

Im Alltagsgebrauch sind besonders die Schäden am Rahmen von Interesse, die äußerlich nicht visuell erkannt werden können, aber möglicherweise einen Einfluss auf die Lebensdauer haben oder schlimmer zu einem plötzlichen Versagen des Rahmens bei Gebrauch führen.

Um die Lebensdauer nach nicht oder kaum sichtbaren Schlagschäden zu ermitteln, wurden Rahmen gezielt in den maßgebenden Bereichen an der Unterseite des Unterrohrs und seitlich am Oberrohr (Bild 39) vorgeschädigt, worauf die zyklische Prüfung des Rahmens nach einem vorgegebenen Lastprofil für Rennräder [134] erfolgte. Der zur Aufbringung des Lastprofils eingesetzte Rahmenprüfstand ist in Bild 51

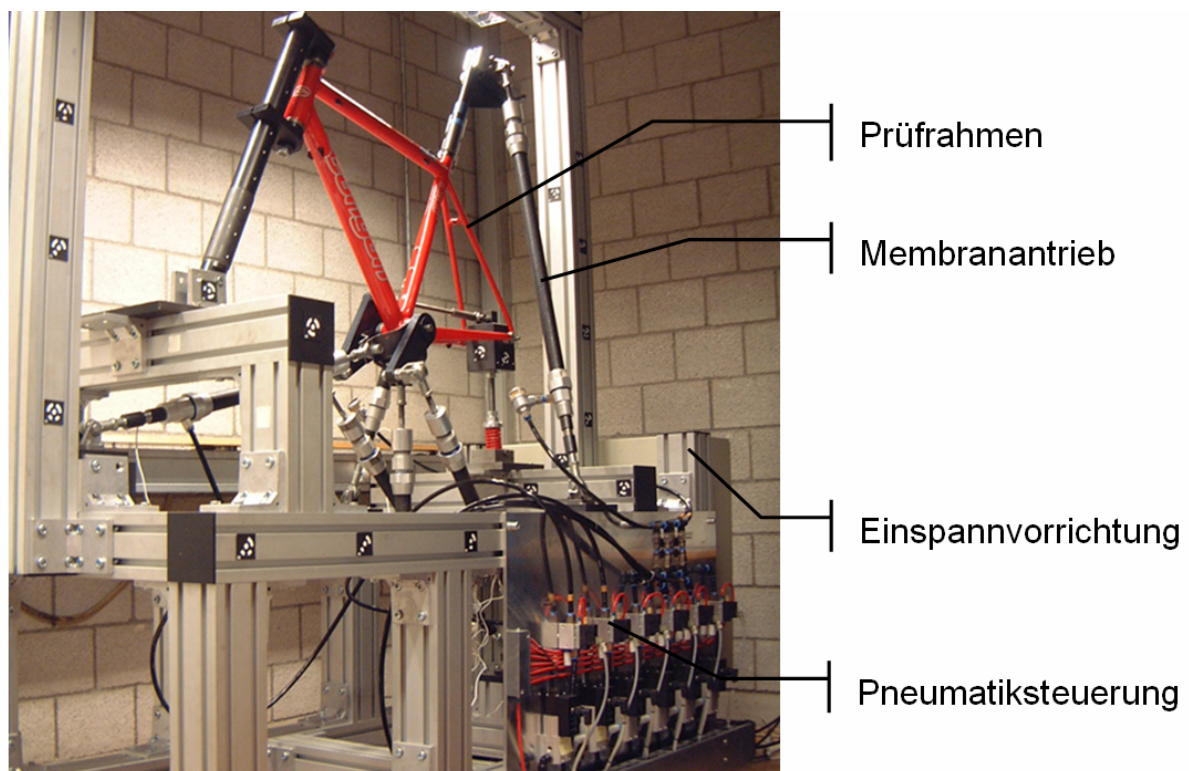


Bild 51: Zyklischer Rahmenprüfstand zur Ermittlung der verbleibenden Lebensdauer nach Stoßeinwirkung (Quelle: FH-Pforzheim)

dargestellt. Der Rahmen wird wirklichkeitsnah in einer Einspannvorrichtung am Steuerrohr und an den Ausfallenden befestigt. An den Lastangriffspunkten Tretlager und Sattel greifen insgesamt sechs pneumatische Membranantriebe an, die es ermöglichen, die Lastfälle Wiegetritt, Sprunglast, Sitz- und Bremslast nachzustellen. Um einen möglichen Steifigkeitsverlust durch zunehmende Schadensausbreitung unter zyklischer Beanspruchung zu ermitteln, wurde die Torsionssteifigkeit des Rahmens um seine Längsachse, die Lenkkopfsteifigkeit C_{LK} , und die Tretlagersteifigkeit C_{TL} , zu Beginn und jeweils nach 20.000 Lastzyklen ermittelt. Nach 100.000 Lastzyklen wurden die Prüfkräfte erhöht und die Steifigkeitskennwerte jeweils nach 15.000 Lastzyklen ermittelt. Überstand ein Rahmen 175.000 Lastzyklen wurden die Prüfkräfte nochmals gesteigert und der Rahmen bis zum Versagen getestet. Die Minimalanforderung für ein Rennradrahmen beträgt 100.000 Lastzyklen. Die Ermittlung der Steifigkeitswerte C_{LK} und C_{TL} erfolgte auf zwei separaten Prüfständen, wofür die Rahmen nach den entsprechenden Lastzyklen aus der Prüfvorrichtung aus- und nach der Messung wieder eingebaut werden mussten. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Steifigkeitskennwerte ist in Bild 52 dargestellt. Sie entspricht den Prüfkriterien, die in einigen Radsportzeitschriften praktiziert werden ([63], [64]).

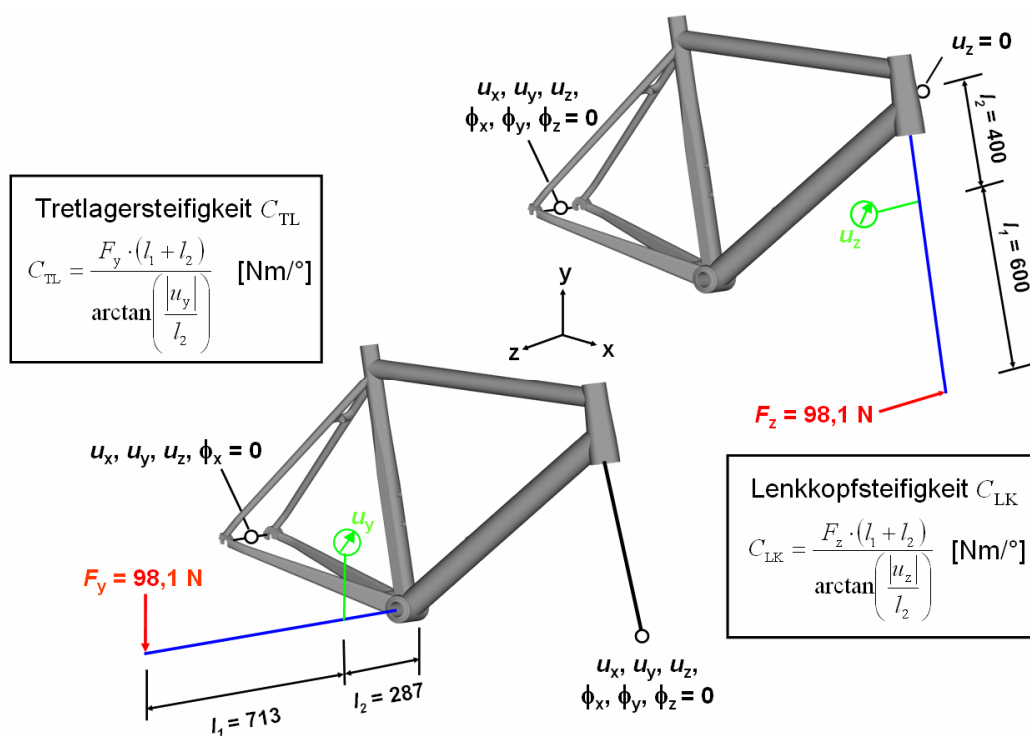


Bild 52: Ermittlung von Lenkkopfsteifigkeit C_{LK} und Tretlagersteifigkeit C_{TL}

Tabelle 18: Prüfplan zur Vorschädigung von Rennradrahmen

Rahmen	Rahmengröße [cm]	Ort der Vorschädigung	Impaktenergie E_{Imp} [J]
RA1	56	Oberrohr	1
		Unterrohr	1
RA2	58	Oberrohr	1
		Unterrohr	1
RA3	56	Oberrohr	2
		Unterrohr	2
RA4	58	Oberrohr	2
		Unterrohr	2

Das Prüfprogramm umfasste die Vorschädigung von vier RR-Rahmen durch jeweils 31 Stoßeinwirkungen an den im Betrieb maßgeblich gefährdeten Stellen am Ober- und Unterrohr. Die Randbedingungen sind in Tabelle 18 zusammengefasst und Bild 53 gibt einen Überblick über die Schadensorte am Rahmen. Die Vorschädigung der Rahmen erfolgte mit dem in Bild 44 vorgestellten Pendelprüfstand. Bild 54 zeigt den Verlauf der Lenkkopfsteifigkeit C_{LK} über der Lastzyklenzahl n . Alle vorgeschädigten Rahmen erreichten die Minimalanforderung von 100.000 Lastzyklen. Aus den experimentell ermittelten Ergebnissen ist kein Steifigkeitsabfall erkennbar. Auch die beiden Rahmen RA2 und RA3, die über 175.000 Lastzyklen erreichten, zeigen

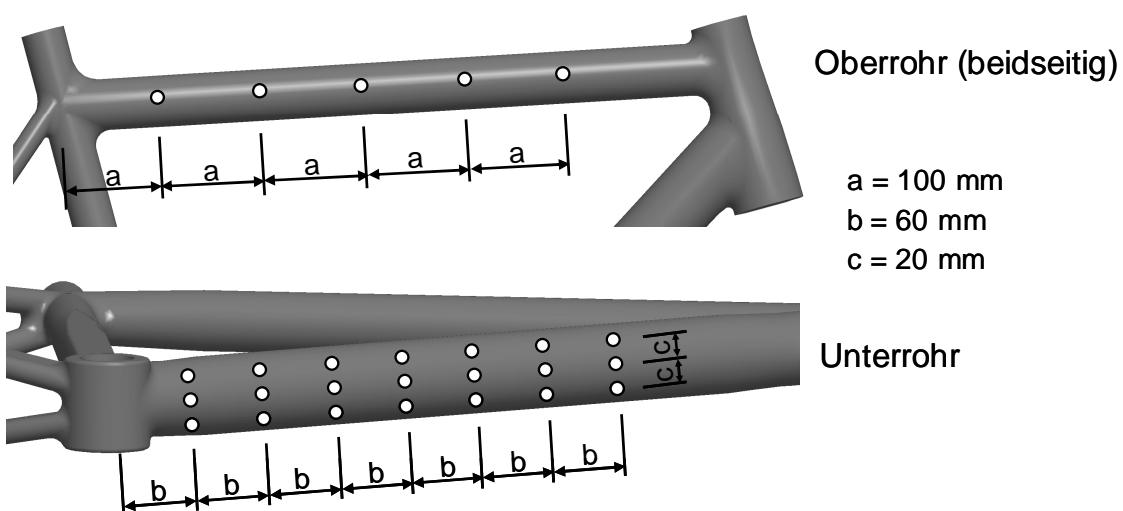


Bild 53: Orte gezielt eingebrachter Schädigungen durch Stoßeinwirkung

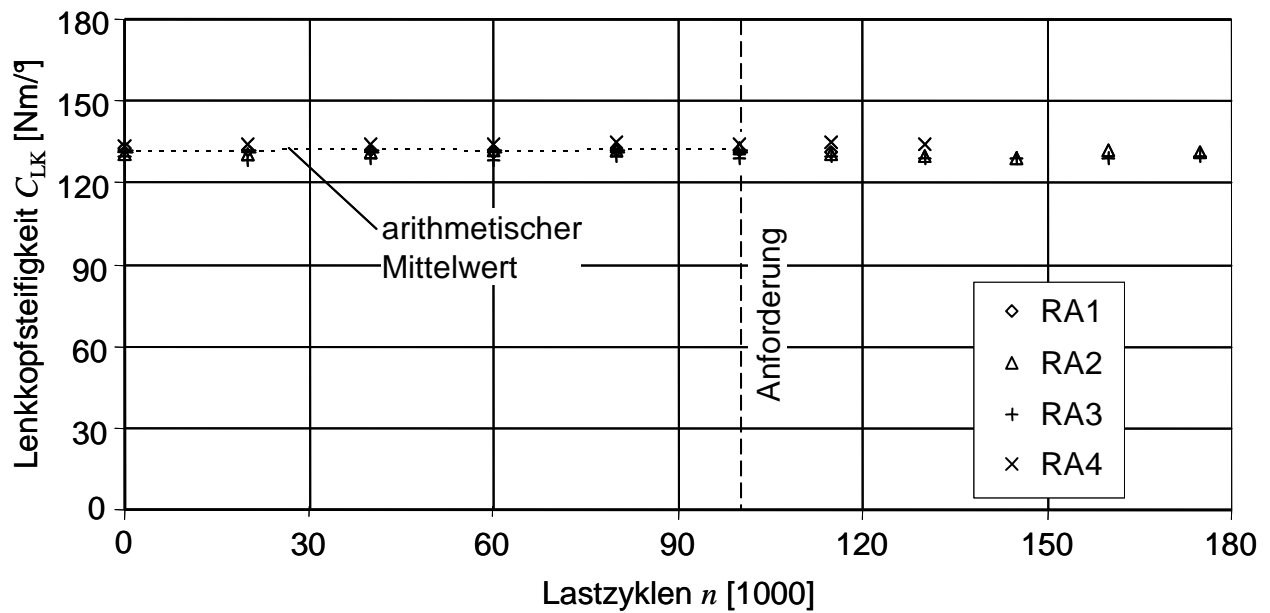


Bild 54: Verlauf der Lenkkopfsteifigkeit C_{LK} über der Lastzyklenzahl n an durch Stoßeinwirkung vorgeschädigten Rahmen

keinen erkennbaren Steifigkeitsabfall. Die Lenkkopfsteifigkeit der Rahmen weist keine großen Streuungen auf. Der arithmetische Mittelwert vor Beginn der zyklischen Prüfung beträgt 131 Nm/° . Der Verlauf des arithmetischen Mittelwerts bis 100.000 Lastzyklen ist nahezu konstant. Bild 55 zeigt den Verlauf der Tretlagersteifigkeit C_{TL} über der Lastzyklenzahl n . Hier liegt der arithmetische Mittelwert vor der zyklischen Prüfung bei 161 Nm/° . Die Abweichungen in der Tretlagersteifigkeit C_{TL} zwischen den Rahmen sind gegenüber der Lenkkopfsteifigkeit C_{LK} größer. Bei den Rahmen RA2, RA3 und RA4 ist kein Steifigkeitsabfall über die Lastzyklen erkennbar. Rahmen RA1 zeigt nach 115.000 Lastzyklen einen Abfall in der Tretlagersteifigkeit C_{TL} von 162 auf 147 Nm/° . Jedoch wurde während der Versuchsdurchführung festgestellt, dass sich die angeklebten Al-Tretlagerschalen lösten, was auch später zum Versagen führte. Tabelle 19 gibt einen Überblick über die erreichten Lastzyklen n der Rahmen RA1-RA4 und das zugehörige Bauteilversagen. Bei allen Rahmen trat ein Bruch im Bereich des Tretlagergehäuses und der rechten Kettenstrebe ein. Kein vorzeitiger Bruch ist im Bereich einer Vorschädigung eingetreten. Durch visuelle Begutachtung konnten an den durch Stoßeinwirkung vorgeschädigten Orten keine Veränderungen festgestellt werden. Dies lässt sich damit erklären, dass die vorgeschädigten Bereiche durch die Einwirkung normaler Betriebslasten sehr gering beansprucht werden.

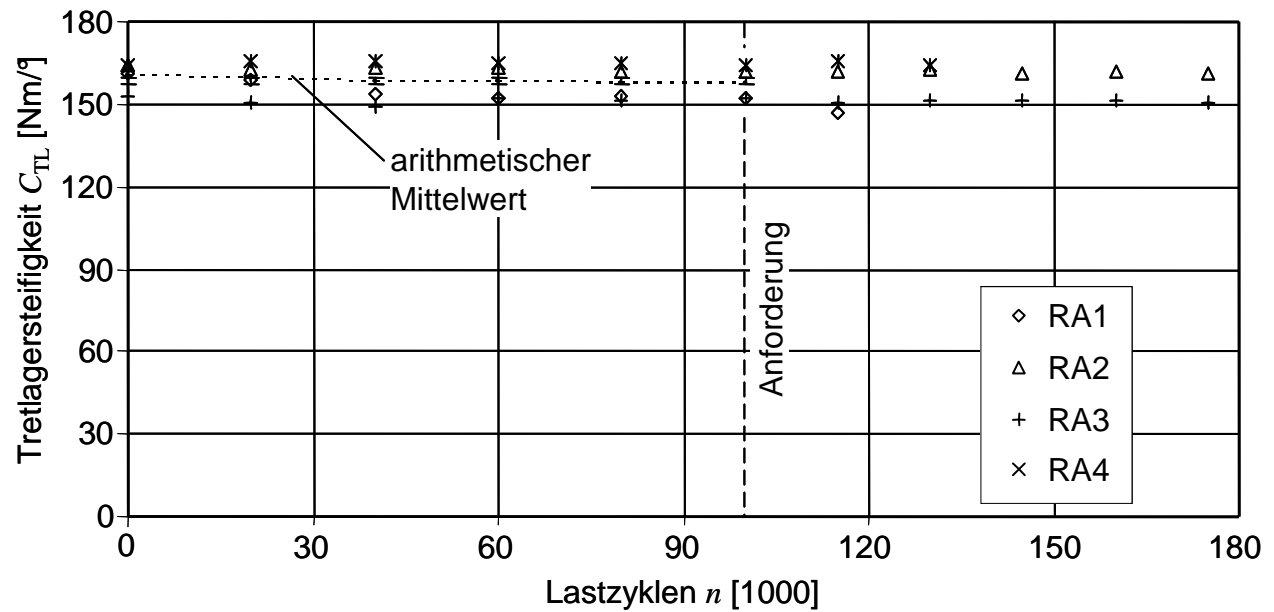


Bild 55: Verlauf der Tretlagersteifigkeit C_{TL} über der Lastzyklenzahl n an durch Stoßeinwirkung vorgeschädigten Rahmen

Tabelle 19: Versagensschwingspielzahl und zugehöriges Bauteilversagen der vorgeschädigten RR-Rahmen RA1 bis RA4

Rahmen	Versagensschwingspielzahl [1]	Bauteilversagen
RA1	129.500	Versagen der Al Tretlagerschalen und Bruch am Tretlagergehäuse
RA2	178.000	Bruch der rechten Kettenstrebe und Anriss an der linken Kettenstrebe.
RA3	178.000	Bruch der rechten Kettenstrebe
RA4	144.500	Anriss an der rechten Kettenstrebe

8 Diskussion

Fahrradrahmen aus CFK haben sich in Hochleistungs-Sportfahrrädern etabliert und erobern zunehmend den ambitionierten Breitensport. Der Erfolg beruht auf der hohen Leichtbaugüte, die mit dem Werkstoff erzielt werden kann. Fahrradrahmen eignen sich aufgrund ihrer Gestalt und den auf sie einwirkenden Beanspruchungen besonders für FKV, da die werkstoffseitig einstellbare Anisotropie genutzt werden kann. Die Erschließung weiterer Bereiche im Fahrradbreitensport ist durch eine zunehmende Automatisierung in der Fertigung und durch eine Senkung der Herstellkosten möglich. Zu beachten ist, dass die Akzeptanz seitens der Kunden allerdings nur aufrechterhalten werden kann, wenn CFK auch werkstoffgerecht eingesetzt und die Alltagstauglichkeit der Bauteile gewährleistet ist. Bei Fahrradrahmen handelt es sich um tragende Konstruktionen und diese können nur in größeren Stückzahlen hergestellt werden, wenn automatisierte und reproduzierbare Fertigungstechnologien sowie eine lückenlose Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Im Betrieb ist zu berücksichtigen, dass der eigentliche Nutzer nur über begrenzte Möglichkeiten einer sicherheitstechnischen Überprüfung seines Fahrradrahmens verfügt.

Die Leistungsfähigkeit eines Rahmens wird bereits in der Konstruktionsphase bei der Festlegung der Bauweise und der damit verknüpften Fertigungstechnologie festgelegt. Praktikable und effiziente Simulationswerkzeuge leisten hier einen erheblichen Beitrag, um bei vorgegebenem Zeitfenster eine möglichst gute Lösung zu erreichen. Durch Optimierungswerkzeuge lassen sich quasi automatisiert anforderungsgerechte Strukturen finden. Hierfür stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung. Je nach Zeitpunkt im Entwicklungsprozess und nach Aufgabenstellung muss eine geeignete Art der Optimierung ausgewählt werden. Voraussetzung für das Gelingen einer Optimierung ist die Generierung eines möglichst wirklichkeitsnahen Strukturmodells, das insbesondere das Antwortverhalten hinsichtlich der definierten Zielfunktion genügend genau abbildet.

Das Werkzeug OpTop zur Optimierung der Rahmengestalt wurde entwickelt, um vor Beginn der eigentlichen Konstruktionsarbeiten ein Ausgangsdesign für die Rahmengestalt zu finden. Die Verschneidungsmöglichkeiten, die innerhalb der parametrisch aufgebauten FE-Geometriemodellierung begrenzt und mit denen üblicher CAD-Systeme nur bedingt vergleichbar sind, führten in sehr begrenzten Fällen zum Programmabbruch. Das Programm musste an dieser Stelle mit minimal veränderter

Geometrie oder durch Veränderung in der Modellerstellung neu gestartet werden. Beim Durchlaufen des Designraumes ist der Größenunterschied zwischen dem Minimal- und Maximalsystem erheblich, was bei einer konstant gewählten Elementgröße mit wachsendem System eine zunehmende Anzahl an Elementen bedeutet und die Rechenzeit kontinuierlich verlängert. Dem kann begegnet werden, indem die Elementgröße in Abhängigkeit von der Systemgröße definiert wird. Hierbei muss auf eine ausreichende Feinheit bei der Vernetzung geachtet werden, um Fehler bei der Massen- und Steifigkeitsermittlung gering zu halten.

Zu Beginn der Optimierungsrechnungen ist die Schrittweite *step_iter* sowohl bei OpTop als auch bei OpLam vorzugeben. Sie bestimmt entscheidend die Rechendauer und die Qualität des Optimierungsergebnisses. Hier bietet es sich an, die Schrittweite unter dem Blickwinkel einer konstruktiv und fertigungstechnisch sinnvollen Größe zu wählen. Bei Fahrradrahmen sind Schrittweiten für OpTop kleiner 1 mm und für OpLam kleiner 5% nicht sinnvoll. Denkbar wäre auch das Optimierungswerkzeug um eine modellgrößenabhängige dynamische Schrittweitenanpassung zu erweitern [73] und dadurch die Rechendauer zu verkürzen.

Die Optimierung der Gestalt und der Laminatkonfiguration ist auf Fahrradrahmen in Differentialbauweise ausgerichtet. Hierbei wird die Geometrie der Rohrstrukturen variiert, wobei die Knotenbereiche und die Lasteinleitungselemente nicht detailliert abgebildet werden. Diese Nichtberücksichtigung führt zu einer Unterschätzung der Knotensteifigkeit. Auf die Gesamtsteifigkeit des Rahmens ist der Einfluss der Knoten und Lasteinleitungselemente jedoch gering, da diese hauptsächlich durch die Rohre bestimmt wird. Weiterhin müssen die Massen der Fügstellen und Lasteinleitungselemente im Vorfeld abgeschätzt werden. Eine Verbesserung könnte durch eine detaillierte Modellierung der Knotenbereiche und der Lasteinleitungselemente erreicht werden. Hierzu würde es sich anbieten, verschiedene Verfahren zur Gestalt-, Form- und Topologieoptimierung zu kombinieren. Die Formoptimierung könnte zur Verbesserung der Rohrübergangsbereiche eingesetzt werden, wohingegen eine parameterfreie Topologieoptimierung zur Verbesserung der kompakt geformten Lasteinleitungselemente, wie beispielsweise der Ausfallenden, genutzt werden könnte.

Nachteilig wirkt sich ebenfalls das Fehlen eines kontinuierlichen Arbeitsablaufes aus. Die in der FE-Umgebung optimierte Gestalt kann nur über ein Austauschformat an das CAD-Programm zur Weiterverarbeitung übertragen werden. Wünschenswert

wäre eine interaktive Durchführung der CAD- und FE-Aktivitäten mit einem vollparametrisierten CAD-Modell, das auch zur Weiterbearbeitung in der CAD-Umgebung genutzt werden kann.

Die Optimierung liefert zu einer vorgegebenen Zielfunktion das zugehörige Ergebnis. Deshalb ist zu Beginn besonders auf die definierten Belastungsgrößen und Randbedingungen zu achten, da die Optimierungsergebnisse oftmals empfindlich auf Abweichungen reagieren, was im Betrieb zu einem gewissen Verlust an Robustheit führt, da die realen Belastungszustände von dem der Optimierung zugrunde gelegten Belastungszustand abweichen können.

Neben der Optimierung der Leichtbaugüte wurde ein Werkzeug entwickelt, das die schichtenweise Festigkeitsanalyse unter Berücksichtigung werkstofflicher Nichtlinearitäten erlaubt. Wie in [39] und [79] erläutert, weisen besonders die matrixdominierten Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen (σ_2 - ε_2) und (τ_{21} - γ_{21}) werkstoffliche Nichtlinearitäten auf, die im Wesentlichen auf Mikroschädigungen zurückzuführen sind. Bei dem in dieser Arbeit charakterisierten CF-EP konnten diese Nichtlinearitäten ebenfalls festgestellt werden. Allerdings ist innerhalb eines beanspruchungsgerecht ausgelegten MSV, in dem die Kräfte im Wesentlichen über die Fasern übertragen werden, der Einfluss der nahezu linear elastischen Kohlenstofffaser dominant. Da die Lamineigenschaften überwiegend von der Bruchdehnung der Faser abhängen, sinkt der Einfluss der matrixdominierten Nichtlinearitäten mit abnehmender Faserbruchdehnung. Der in Tabelle 14 dargestellte Vergleich zwischen linearer bzw. nichtlinearer Berechnung und dem Experiment verdeutlicht den zu vernachlässigenden Einfluss. Hier ist bezüglich des Eintritts von Zwischenfaserbruch und Faserbruch nahezu kein Unterschied zwischen rechnerischen Analysen mit und ohne Berücksichtigung werkstofflicher Nichtlinearitäten feststellbar. Allerdings ist diese Schlussfolgerung nicht auf alle FKV übertragbar.

Das Zwischenfaserbruch-Kriterium von Puck unterscheidet zwischen den verschiedenen Bruchmoden A, B und C. Bei beanspruchungsgerecht ausgelegten MSV mit mindestens drei Faserorientierungen konnten rechnerisch weder Modus-B- noch Modus-C-Zwischenfaserbrüche detektiert werden. Dies ist darin begründet, dass keine hohen Schiebungen γ_{21} zum Erreichen von Modus-B-Zwischenfaserbruch auftreten, da vorher in den Nachbarschichten Faserbruch eintritt. Weiterhin ist die Druckbruchdehnung parallel zur Faserrichtung mit 0,46 % weit unterhalb der Druck-

bruchdehnung quer zur Faserrichtung ($\varepsilon_{2,ult}^c = 1,98 \%$), so dass vor Erreichen der kritischen Modus-C-Zwischenfaserbruch-Anstrengung ebenfalls Faserbruch eintritt. Bei dem untersuchten Werkstoff konnte daher lediglich Faserbruch und Modus-A-Zwischenfaserbruch ermittelt werden.

Die schlagartige Degradation der Steifigkeit bei Eintritt von unterkritischen Modus-A-Zwischenfaserbrüchen führte in dem rechnerisch ermittelten $(\sigma_x-\varepsilon_x)$ -Kurvenverlauf (vgl. Bild 31) zu einer Unstetigkeit in Form eines Dehnungssprungs, da der Bereich der sukzessiven Rissbildung bis hin zum Erreichen der vollständigen Rissättigung durch das angesetzte Degradationsmodell nicht berücksichtigt wird. Hier besteht Forschungsbedarf, um abgesicherte Kennlinien zur Beschreibung der sukzessiven Rissbildung für verschiedenste Faser/Matrix-Kombinationen, Schichtdicken und Beanspruchungen zu erhalten. Weiterhin treten an Strukturen im Gegensatz zu einfachen Flachproben, die einer homogenen Spannungsverteilung unterliegen, Modus-A-Zwischenfaserbrüche nicht schlagartig über die gesamte Struktur ein, so dass vielmehr eine sukzessive Schadensausbreitung eintritt. Für die Dimensionierung liefert die angewandte Methodik jedoch konservative Vorhersagen.

Das Ziel von Festigkeitsanalysen sollte eine möglichst hohe Vorhersagegüte sein. Dennoch sollte bei praxisnahen Anwendungen ein Kompromiss zwischen Genauigkeit, Effizienz und Anwendbarkeit erreicht werden, da oftmals die Streuungen in den Werkstoffeigenschaften und die Ungenauigkeiten in der Fertigung einen wesentlich größeren Einfluss auf die Vorhersage ausüben. So konnten bei den durchgeführten Faservolumengehaltsbestimmungen Abweichungen gegenüber den Herstellerangaben von bis zu 5 % festgestellt werden. Während die einfache Standardabweichung bei den Elastizitätskennwerten gering ist, fällt sie bei den experimentell ermittelten Festigkeitskennwerten deutlich höher aus. Da die Fertigung überwiegend in Handarbeit erfolgt, sind Faserwinkeländerungen nicht auszuschließen. Weiterhin war durch den Herstellungsprozess der Rohre im Schlauchblasverfahren eine Abweichung in der Wanddicke in Höhe von bis zu 10 % erkennbar.

Der Vergleich zwischen Experiment und rechnerischer Vorhersage an einem quasi-isotropen Laminat unter einachsiger Zugbelastung zeigte eine gute Übereinstimmung des $(\sigma_x-\varepsilon_x)$ – Kurvenverlaufs und der Spannung σ_x bei Laminatversagen. Die Vorhersage war konservativ und die Vorhersage des Laminatversagens lag innerhalb der einfachen Standardabweichung des Experiments. Bei einem Vergleich des Lastfalls

RR-Rahmen unter Frontallast liegt die rechnerisch vorhergesagte Bruchkraft 22 % oberhalb der Werte des Experiments. Unter Beachtung der Komplexität des Systems und der gegebenen Ungenauigkeiten ist die Übereinstimmung zufriedenstellend. Versagensursache am Rahmen war Faserdruckbruch auf der Unterseite des Unterrohrs. Generell hat sich bei den Festigkeitssimulationen gezeigt, dass die Druckfestigkeit R_{\parallel}^c parallel zur Faserrichtung die wichtigste Werkstoffkenngröße darstellt, da sie deutlich kleiner ist als die korrespondierende Zugfestigkeit R_{\parallel}^t .

Im Alltagsgebrauch können neben den Beanspruchungen, die über die dafür vorgesehenen Lasteinleitungsstellen eingeleitet werden, zusätzlich transversale Stoßeinwirkungen auf Fahrradrahmen einwirken. CFK reagiert hier im Vergleich zu Metallen relativ spröde. Durch Sturzversuche an Rennrädern konnte eine maximale Energie von 18 J beim Aufprall ermittelt werden. Bei dieser Beanspruchung wiesen die getesteten Leichtbauahmen aus Aluminium und CFK schwerwiegende Schäden auf, sodass eine weitere Nutzung nicht mehr möglich war.

Die Versuchsdurchführung stellte die für den Rahmen ungünstigste Sturzvariante dar, da der sphärische Impaktor punktuell in der Mitte des Oberrohrs einschlug, ohne dass andere Fahrradkomponenten zur Energieaufnahme herangezogen wurden. Durch die Sperrung der translatorischen Freiheitsgrade in der Halterung konnte das Rennrad darüber hinaus keine Ausweichbewegung vornehmen. Bei diesem Versuch ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse für die Impaktenergie sehr stark vom Rahmengewicht und den angebauten Komponenten abhängen, da gefüllte Trinkflaschen oder weitere Utensilien, wie Werkzeug und Ersatzschlauch, die Masse zusätzlich erhöhen. Schließlich können Stürze auf den Rahmen aus dem Fahrvorgang heraus die Impaktenergie weiterhin vergrößern.

Aus den Erkenntnissen der Sturzversuche wurden Impaktuntersuchungen an repräsentativen Rohrstrukturen durchgeführt. Hier konnte gezeigt werden, dass Schäden sowohl bei Aluminium- als auch bei CFK-Rohren bereits bei der kleinsten geprüften Impaktenergie von 0,5 J auftraten. Bei Aluminium äußerten sich die Schäden durch Beulen, die mit zunehmender Impaktenergie an Größe zunahmten, bei CFK traten bei dieser Energie Schäden in Form von Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen auf, die an Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop an Schnitten über die Laminatdickenrichtung festgestellt werden konnten. Die Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop lassen nicht die Beurteilung der Schadensausbreitung in Richtung des Schnitts durch die

Laminebene zu. Hierzu wären zusätzliche Untersuchungen unter Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren, beispielsweise durch Impulsthermografie, Röntgen oder Ultraschall, notwendig. Um den Schadenseintritt genauer definieren zu können, wären weitere Prüfungen mit Energien kleiner 0,5 J notwendig. Um den Einfluss von Stoßeinwirkungen auf die Lebensdauer und die Steifigkeit eines Fahrradrahmens zu untersuchen, wurden RR-Rahmen gezielt an den Ober- und Unterrohren vorgeschädigt und einem Lastprofil für RR-Rahmen, das die wesentlichen Beanspruchungen aus dem normalen Fahrbetrieb abdeckt, auf einem Prüfstand ausgesetzt. Eine zunehmende Schädigungsausbreitung konnte aus den Steifigkeitsmessungen am Rahmen, die während der zyklischen Prüfungen durchgeführt wurden, nicht festgestellt werden. Allerdings bewerten die Steifigkeitsmessungen die globalen Rahmeneigenschaften und lokal begrenztes Schädigungswachstum könnte aufgrund des geringen Einflusses auf die Rahmensteifigkeit dadurch möglicherweise nicht detektiert werden. Hierzu wären weitergehende Untersuchungen notwendig, die die zerstörungsfreie Schädigungsausbreitung in der Laminebene von rohrförmigen Strukturen erlauben. Abschließend bleibt zu erwähnen, dass die gewonnenen Ergebnisse bei den Impaktuntersuchungen nicht verallgemeinert werden können, da diese deutlich vom Werkstoff, der Laminatkonfiguration und der Rahmengeometrie mit den entsprechenden Rohrquerschnitten abhängen. Mit der Verwendung von FKV als Rahmenwerkstoff ist eine Festlegung der Impaktbeständigkeit in Abhängigkeit des Einsatzgebietes des Fahrradrahmens dringend erforderlich. Hierfür müssten weitergehende Untersuchungen zu Impaktbeanspruchungen im naheliegenden Fehlgebrauchsfall durchgeführt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

FKV bieten das Potenzial für Ultraleichtbau im Bereich von Hochleistungs-Rahmen für Sportfahräder, was durch den Einsatz von Leichtbautechnologien auch zunehmend ausgeschöpft wird. Die Entscheidung, ob das Bauteil eine geforderte Leistungsfähigkeit erreicht, fällt maßgeblich in der Konstruktions- und Dimensionierungsphase.

Zur Findung eines geeigneten Rahmenwerkstoffs wurde ein Bewertungsschema entwickelt, welches die Eignung von metallischen und FKV-Werkstoffen für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete beurteilt. Ein anschließender Überblick über die verschiedenen Bauweisen und Fertigungstechnologien erlaubt eine geeignete Auswahl je nach vorhandenem Anforderungsprofil.

Zur Erhöhung der Leichtbaugüte wurde ein effizientes Berechnungswerkzeug entwickelt, welches mit Hilfe von parametrischen Geometrie-FE-Modellen auf Basis eines Uphill-Climbing-Gradientenverfahrens zur Gestaltoptimierung (OpTop) von in Differentialbauweise gefertigten Rahmen verwendet werden kann. Durch den Algorithmus ist es möglich, ausgehend von einem Minimalsystem, innerhalb eines zur Verfügung stehenden Designraums, die optimierte Gestalt zu einer vorgegebenen Zielfunktion zu ermitteln. In einem daran anschließenden Algorithmus (OpLam) kann in jedem Rohr die zugehörige optimale Laminatkonfiguration ermittelt werden. OpTop und OpLam berücksichtigen in besonderem Maße die werkstoffspezifischen und fertigungsspezifischen Anforderungen von FKV.

Weiterhin wurde ein praktikables Berechnungswerkzeug zur vollständigen schichtenweisen Bruchanalyse aus den Bausteinen Spannungsermittlung, Festigkeitskriterium und Steifigkeitsdegradation entwickelt und in ein kommerzielles FE-Programm implementiert. Das Programm dient der Vorhersage der rechnerischen Festigkeit vom Erstschnittversagen bis hin zum Laminatversagen und erlaubt die Unterscheidung der wesentlichen Schädigungsformen von FKV-Laminaten. Die Verifizierung erfolgte am Beispiel eines Zugstabes und eines komplexen RR-Rahmens.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Werkzeuge zur Steifigkeitsoptimierung und zur Festigkeitsanalyse wurden ein RR-Rahmen, ein Hauptrahmen eines gefederten MTB und ein Hardtail-Rahmen aus CFK entwickelt. Die drei Rahmensysteme gehören weltweit zu den leichtesten und steifsten. Die Werkzeuge erlaubten eine zügige Gestaltfindung sowie die Ermittlung der Laminatkonfigurationen in jeder Einzelstruktur.

Mit dem Festigkeitsanalysewerkzeug konnten die kritischen Bereiche eines Rahmens detektiert und durch lokale Verstärkungen entschärft werden. Die Alltagstauglichkeit der kommerziell vertriebenen Rahmen konnte inzwischen durch mehrere Millionen gefahrener Kilometer sowohl in der Freizeit als auch im professionellen Wettkampfeinsatz belegt werden. Ein Vergleich verschiedener Werte zur Quantifizierung der Leichtbaugüte an führenden CFK und Al-Rahmen zeigte deutlich, welches großes Potenzial der Werkstoff CFK besitzt, allerdings wurde auch die große Streubreite der auf dem Markt erhältlichen Rahmen deutlich.

Anhand von Fallversuchen aus senkrechter (90°) und schräger (45°) Lage, wurden Impaktenergien bis 18 J ermittelt. Die Stürze führten zu schwerwiegenden Schäden an den Leichtbaurahmen und schlossen eine weitere Verwendung aus. Weiterführende Versuche an repräsentativen CF-EP-Rohrprobekörpern zeigten, dass bereits bei einer Energie von 0,5 J Schäden im Laminat in Form von Zwischenfaserbruch und Delamination auftraten und der Fasertyp nur einen geringen Einfluss auf den Schadenseintritt ausübt. Im Gegensatz hierzu beeinflusst der Fasertyp bei höheren Energien das Schädigungsausmaß wesentlich. Um den Einfluss von nicht sichtbaren Impaktschäden auf die Lebensdauer von CFK-Rennradrahmen zu ermitteln, wurden vier Rahmen in den hierfür relevanten Bereichen gezielt vorgeschädigt und anschließend einem realitätsnahen zyklischen Lastprofil auf einem Rahmenprüfstand ausgesetzt. Hier zeigte sich, dass die eingebrachten Vorschädigungen nicht zu einem Abfall der Torsions- und Lenkkopfsteifigkeit der Rahmen führten. Unter den angesetzten Lastprofilen konnte an den vorgeschädigten Rahmen bis zum Versagenseintritt kein verändertes Bruchverhalten gegenüber nicht vorgeschädigten Rahmen festgestellt werden.

Die Weiterentwicklung effizienter und praktikabler Simulationswerkzeuge zur Dimensionierung und Optimierung helfen, das Potenzial der eingesetzten Strukturwerkstoffe weiter auszuschöpfen. Eine Verbesserung des Optimierungsalgorithmus kann durch die Berücksichtigung mehrerer Zielfunktionen in einem Berechnungsgang erreicht werden. Weiterhin sollte eine Ausweitung des Modells auf beliebige Rohrquerschnitte und -übergangsradien ermöglicht werden, wodurch sich der Einsatzbereich auch auf andere Rahmenbauweisen (integrierende und Integral-Bauweise) erweitern lassen würde. Auf Seiten der FKV-Werkstoffe wäre die Einbeziehung unterschiedlicher Faser/Matrix-Kombinationen für die Einzelstrukturen sowie die Mög-

lichkeit variabler Wanddicke innerhalb einer Einzelstruktur sinnvoll. Durch Einbeziehung eines Algorithmus zur Form- und Topologieoptimierung könnten auch Knotenbereiche sowie Lasteinleitungselemente in die Betrachtungen einbezogen werden.

Eine Weiterentwicklung des Festigkeitsanalysewerkzeugs erscheint sinnvoll hinsichtlich der verbesserten Abbildung der sukzessiven Rissbildung unter Berücksichtigung des Mittragens zwischen den Rissen, der Faserumorientierung durch äußere Belastungen bei besonderen Laminatkonfigurationen, des In-situ-Effekts und der Abhängigkeit von Spannungsinteraktionen auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen. Bei der Beschreibung des Nachrissverhaltens und des Einflusses des In-Situ-Effekts herrscht noch Unsicherheit, hier wäre die Durchführung von weiteren Grundlagenarbeiten notwendig. Der Eigenspannungseinfluss aus dem Fertigungsprozess hat auf den Eintritt des Erstschichtversagens einen deutlichen Einfluss, in welcher Höhe dieser berücksichtigt werden muss, ist unter Fachleuten ebenfalls umstritten und müsste weiter erforscht werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit sollten weitere Untersuchungen zum Einfluss transversaler Stoßeinwirkung auf Fahrradrahmen durchgeführt werden. Hier wären Untersuchungen zur Feststellung des Schadeneintritts und der Schadenausbreitung unter nachfolgender zyklischer Belastung notwendig. Dabei sollte der Einfluss verschiedener Parameter wie Faser/Matrix-Kombination, Wanddicke, Laminatkonfiguration und Rohrquerschnitt berücksichtigt werden. Weiterhin sollten die Bestimmung der maximal auftretenden Stoßenergien und die Ermittlung der verbleibenden Lebensdauer nach Impaktbelastungen für andere Fahrradtypen mit anderen Einsatzbereichen, insbesondere für Mountainbikes, untersucht werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.quarks.de/fahrrad/04.htm> (Datum: 30.11.2006)
- [2] N.N.: Der Brockhaus in 10 Bänden, Neuausgabe.F.A. Brockhaus, Mannheim, 2005.
- [3] F. Alderson: *Bicycling - A History*. Praeger Publishers, New York, 1972.
- [4] Bode, A., Dreifert, M., Hassink, U., Pooch, A., Stempel, T.: *Abenteuer Fahrrad*. Skript zur WDR-Sendereihe Quarks & Co, Köln, 1998.
- [5] Smolik, C. H., Etzel, S.: *Das große Fahrradlexikon*. Technik, Praxis, Material von A-Z. BVA Bielefelder Verlag, Bielefeld, 2002.
- [6] Smolik, C. H.: *Fahrradtuning für Rennrad und Mountainbike*, 2. überarb. Auflage. Delius Klasing Verlag GmbH, München, 1995.
- [7] Edelmann-Nudder, J.: *Sport und Technik – Anwendungen moderner Technologien in der Sportwissenschaft*. Shaker Verlag, Aachen, 2005.
- [8] Kaiser, M., Arnold, R., Himmel, N.: *Entwicklung eines Hochleistungs-CFK-Rennrad-Chassis*. 11. Nationales Symposium der Sampe 2005, Darmstadt, 3.–4. März 2005.
- [9] Kaiser, M. Himmel, N., Schlarb, A. K.: *High Performance Racing Bike Chassis Made of Carbon Fiber Reinforced Plastics*. University of Kaiserslautern - International, Fachbeitrag in der Brochüre der Technischen Universität Kaiserslautern zur Weltmeisterschaft 2006, Seiten 62–65.
- [10] <http://www.ziv-zweirad.de/> (Datum: 15.10.2005)
- [11] *UCI Cycling Regulations: Part 1. General Organisation of Cycling as a Sport*. 2005.
- [12] *DIN 79100: Fahrräder – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren*. 2000.
- [13] *ISO 4210: Cycles - Safety Requirements for Bicycles*. Fourth Edition. International Organization for Standardization. 1996.
- [14] *DIN plus: Zertifizierungsprogramm – Fahrräder und Komponenten*. 2006.
- [15] *DIN EN 14766: Geländefahrräder – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren*. Deutsche Fassung EN 14766, 2005.
- [16] *DIN EN 14781: Rennräder – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren*. Deutsche Fassung EN 14781, 2005.

- [17] JIS D 9203: Method of Stability Test for Bicycles. Japanese Industrial Standard, 1993.
- [18] JIS D 9301: Bicycles -- General Specification, 2004.
- [19] Arbeitskreis WK464 des ASTM: New Test Methods for Bicycle Frames.
- [20] Brust, E.: Zum Niveau der neuen Fahrradnormen: Landmaschinen– oder Flugzeugbau. Rundschreiben vom 25.07.2006, Velotech.
- [21] Van Bommel, P.: Lebensdauervorhersage anhand der Prüfung definiert vorgeschädigter, dynamisch hochbelasteter Bauteile. Dissertation der RWTH Aachen, 2001.
- [22] Zedler, D.: Im Reich der Normen. Tour, 8/2002.
- [23] www.efbe.de (Datum: 31.10.2006)
- [24] www.velotech.de (Datum: 31.10.2006)
- [25] Groß, E.: Betriebslastermittlung, Dimensionierung, strukturmechanische und fahrwerkstechnische Untersuchungen von Mountainbikes. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 308, Lüneburg, 1996.
- [26] Spahl, R.: Ermittlung der Prüfbedingungen für Lebensdauertests. RadMarkt, Heft 6/95, Bielefeld, 1995.
- [27] Spahl, R.: Lastkollektivbezogene Prüftechnik von Sicherheitsbauteilen an Fahrzeugen. Shaker-Verlag, Aachen, 1996.
- [28] Vötter, M., Groß, E., Esser, S., Born, A., Flamm, M., Rieck, D.: Betriebslasten an Fahrrädern. Berichtsnummer F27, Bericht der BAST, 1999.
- [29] Häberle, J., Schlimmer, M.: Ultraleichtbau in der Praxis – neueste Entwicklungen. 9. Nationales Symposium der Sampe 2003, Clausthal-Zellerfeld, 2003.
- [30] Beitz, W., Grote, K.-H.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau. 21. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [31] Hufnagel, W.: Aluminium – Taschenbuch. 3. Auflage, Aluminium Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [32] Honeycombe, R., Hancock, P.: Metallurgy and Materials Science, Light Alloys. 3. Auflage, Butterworth – Heinemann, London, 2000.
- [33] Weißenbach, W: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 14. Auflage; Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000.
- [34] N.N.: Fachkunde Fahrradtechnik. Europa Lehrmittel Verlag, 2006.
- [35] DIN EN 10020: Begriffsbestimmungen für die Einteilung der Stähle. Deutsche Fassung, 2000.

- [36] <http://www.aluminum.org/> (Datum: 8.1.2006)
- [37] Oberbach, K. et al.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. Hanser-Verlag, München, Wien, 2004.
- [38] Neitzel, M., Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. Hanser-Verlag, München, Wien, 2004.
- [39] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [40] Himmel, N.: Faserkunststoffverbund-Bauweisen. Habilitationsschrift, Technische Universität Kaiserslautern, 2003 (IVW-Schriftenreihe Bd. 39, Herausgeber Prof. Dr.-Ing. A.K. Schlarb).
- [41] Himmel, N.: Verbundwerkstoffbauweisen. Vorlesungsmanuskript, Technische Universität Kaiserslautern, 2005.
- [42] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Fasern und Matrices. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [43] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [44] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999.
- [45] Michaeli, W., Huybrechts, D., Wegener, M.: Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen. Einführung und praktische Hilfen. Hanser-Verlag, München, Wien, 1994.
- [46] Moser, K.: Faser-Kunststoff-Verbund. Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [47] Jost, N.: Vernetzung und Chemorheologie von Duromeren mit hybrider und interpenetrierender Struktur. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2004. (IVW-Schriftenreihe Bd. 43, Herausgeber Prof. Dr.-Ing. A.K. Schlarb).
- [48] Kaiser, M., Noll, T., Heß, H., Himmel, N.: LION – Ein Berechnungswerkzeug zur Analyse von FKV-Schalenstrukturen. IVW-Kolloquium, Kaiserslautern, 2006. (IVW-Schriftenreihe Bd. 68, Herausgeber Prof. Dr.-Ing. A.K. Schlarb)
- [49] www.architonic.com (Datum: 02.05.2006)
- [50] www.trekbikes.com (Datum: 05.01.2006)

- [51] Sobek, W.: Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren. Vorlesungsmanuskript, Universität Stuttgart, 2005.
- [52] Klein, B. Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 6. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2005.
- [53] www.carbonsports.de (Datum: 05.07.2006)
- [54] www.canyon.com (Datum: 04.08.2006)
- [55] Smolik, H. C.: Fahrradrahmenbau. Material-Geometrie-Fertigung. Moby-Dick Verlag GmbH, Kiel, 1994.
- [56] Nelson, J.: Aluminum Frame Build Incorporates Carbon Fiber Tubes. High-Performance Composites, 1, 2006.
- [57] Kuhn, M.: Zur strukturmechanischen Auslegung unidirektional- und gewebeverstärkter Faserkunststoffverbund-Strukturen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2003 (IVW-Schriftenreihe, Bd. 38, Herausgeber Prof. Dr.-Ing. A.K. Schlarb).
- [58] Lehmann, U., Michaeli, W.: Herstellung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern im Schlauchblasverfahren. Tagungsband, 28. AVK-Tagung, Baden-Baden, Oktober 1997.
- [59] Ziegmann, G., Hintermann, M.: Fibre Composite Mountain Bike. Kunststoffe-Plast Europe 89 (2), Februar, 1999, Seiten 95–99.
- [60] www.naegeli.ch (Datum: 5.5.2006)
- [61] www.hexcel.com (Datum 7.9.2006)
- [62] Flemming, M., Roth, S.: Faserverbundbauweisen - Eigenschaften. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [63] Radsportmagazin TOUR: www.tour-magazin.de
- [64] Radsportmagazin BIKE: www.bike-magazin.de
- [65] Radsportmagazin Mountainbike: www.mountainbike-magazin.de
- [66] Radsportmagazin Velonews: www.velonews.com
- [67] Friedrich, M.: Das Beste vom Rechner. CADplus Business + Engineering, 5/2006, Seiten 40–44.
- [68] Friedrich, M.: Strukturoptimierung - Über die Wahl der richtigen Methode bei industriellen Fragestellungen. Digital Engineering Magazin, 03/2006, Seiten 62–64.
- [69] Clausen, P. M., Pederson, C. B.: Non-Parametric Large Scale Structural Optimization for Industrial Applications. III European Conference on Computa-

- tional Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering (ECCM), Portugal, 2006.
- [70] Mattheck, C.: Why they grow, how they grow: The mechanics of trees. *Arboricultural Journal*, 14 (1990), Seiten 1–17.
- [71] Reuschel, D.: Untersuchung der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [72] Trampert, S., Beykirch, R., Meske, R., Lauber, B.: Reduzierte Entwicklungszeiten durch Anwendung programmgesteuerter Strukturoptimierung bei der Simulation von Verbrennungsmotoren. 10. Automobiltechnische Konferenz Virtual Powertrain Creation, München, 19.-20. Oktober 2006.
- [73] Kelley, C. T.: *Iterative Methods for Optimization*. SIAM Frontiers in Applied Mathematics, 1999.
- [74] Rardin, L. R.: *Optimization in Operations Research*. Prentice Hall, 1997.
- [75] Zabinsky, Z. B.: *Stochastic Adaptive Search for Global Optimization*. Vol. 72, Springer-Verlag, 2005.
- [76] Nelder, J., Mead, R. A.: A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal*, 1965, Seiten 308–313.
- [77] Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, P. E.: Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex-Method in low Dimensions. *SIAM Journal of Optimization*, 9, 1998, Seiten 112–147.
- [78] Kaiser, M., Himmel, N.: Carbon Fiber Reinforced Plastics – Trendsetting Material for High Performance Racing Bike Chassis. *The Engineering of Sport 6*, Volume 3. New York, Springer, (2006), pp. 123–128.
- [79] VDI 2014, Blatt 3: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund. Berechnungen. Verein Deutscher Ingenieure, September 2006.
- [80] Puck, A.: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten*. Hanser-Verlag, München, Wien, 1996.
- [81] Hill, R.: A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, Issue 1033, 1948, Seiten 281–297.
- [82] Hashin, Z.: Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. *Journal of Applied Mechanics*, 47, 1980, Seiten 329–334.

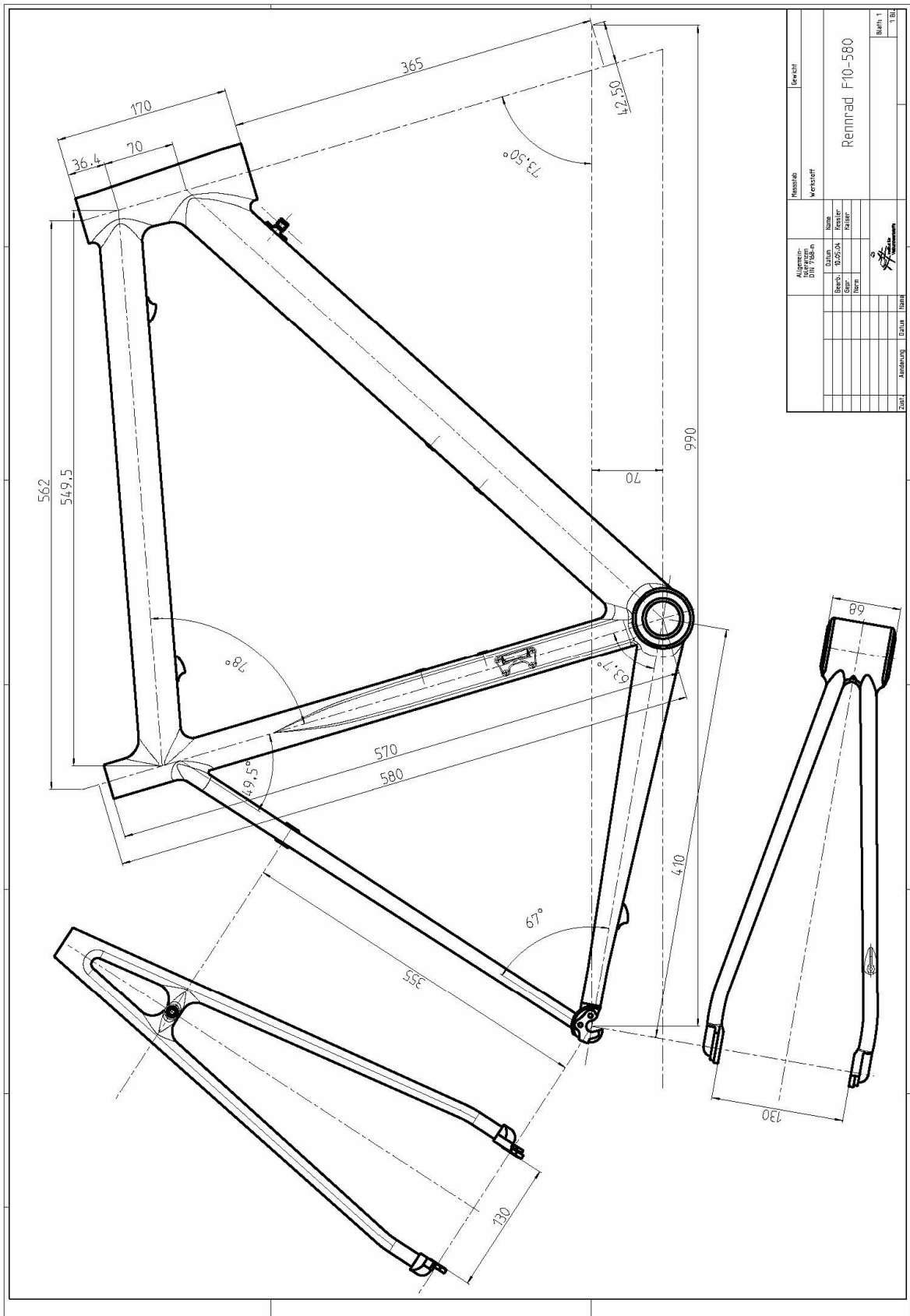
- [83] Azzi, V. D., Tsai, S. W.: Anisotropic Strength of Composites. *Experimental Mechanics*, 1965, Seiten 283–288.
- [84] Tsai, S. W., Wu, E. M.: A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. *Composite Materials*, 5 1971, Seiten 58–80.
- [85] Kaiser, M.: Failure Criteria for Strength Prediction of Fibre Reinforced Plastics. Interner Bericht 03-011, Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, 2003.
- [86] Paris, F.: A Study of Failure Criteria of Fibrous Composite Materials. NASA/CR-2001-210661, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2001.
- [87] Hinton, M. J., Soden, P. D.: Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites, Part A. Special issue, *Composites Science and Technology*, Vol. 58, 1998.
- [88] Hinton, M. J., Kaddour, A. S., Soden, P. D.: Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites, Part C. Special issue, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004.
- [89] Technologies for Carbon Fibre Reinforced Modular Automotive Body Structures (TECABS), Competitive and Sustainable Growth, Project No. G3RD-CT-2000-00102.
- [90] Hahn, H. T.: Nonlinear Behaviour of Laminated Composites. *Journal of Composite Materials* 7, 1973, Seiten 257–267.
- [91] Kopp, W. J.: Zur Spannungs- und Festigkeitsanalyse von unidirektionalen Faserverbundwerkstoffen. Dissertation, RWTH Aachen, Verlag Mainz, 2000.
- [92] Sleight, D. W.: Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures. NASA/TP-1999-209107, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 1999.
- [93] Nahas, M. N.: Analysis of Non-Linear Stress-Strain Response of Laminated Fibre-Reinforced Composites. *Fibre Science and Technology*, Vol. 20, 1984, Seiten 297–313.
- [94] Ramberg, W., Osgood, W. R.: Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC, 1943.
- [95] Weber, T., Schürmann, H.: Verbesserung der nichtlinearen Versagensanalyse von Laminaten. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2005, Friedrichshafen, 26.–29. September 2005 (CD-Rom).

- [96] Puck, A., Kopp, M., Knops, M.: Guidelines for the Determination of the Parameters in Puck's Action Plane Strength Criterion. *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002, Seiten 371–378.
- [97] Puck, A., Schürmann, H.: Failure Analysis of FRP Laminates by Means of Physically Based Phenomenological Models. Special issue, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002, Seiten 1633–1662.
- [98] Ehrlich, I.: Impaktverhalten schwach gekrümmter Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2004.
- [99] Hahn, H. T., Tsai, S. W.: On the Behaviour of Composite Laminates After Initial Failure. *Journal of Composite Materials*, Vol. 8, 1974, Seiten 288–305.
- [100] Nahas, M. N.: Survey of Failure and Post-Failure Theories of Laminated Fibre Reinforced Composites. *Journal of Composite Technology and Research* Vol. 8, No. 4, 1986, Seiten 138–153.
- [101] Knops, M.: Sukzessives Bruchgeschehen in Faserverbundlaminaten. D82, Dissertationsschrift, RWTH Aachen, Aachen, Verlag Mainz, 2003.
- [102] Hinton, M. J., Kaddour, A. S., Soden, P.D.: Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites, Part B. Special Issue, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002.
- [103] Yamada, S. E., Sun, C. T.: Analysis of Laminate Strength and its Distribution. *J. Composite Materials*, Vol. 12, 1978, Seiten 275–284.
- [104] Knops, M., Bögle, C.: Gradual Failure in Fibre/Polymer Laminates. *Composites Science and Technology*, 66, 5, 2006.
- [105] Camanho, P. P., Dávila C. G., Pinho, S. T., Iannucci, L., Robinson, P.: Prediction of In-Situ Strength and Matrix Cracking in Composites under Transverse Tension and In-Plane Shear. *Composites Part A*, 37, 2006, Seiten 165–176.
- [106] DIN EN ISO 527–1: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze. 1996.
- [107] DIN EN ISO 527–4: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe. 1997.
- [108] DIN EN 2597: Luft- und Raumfahrt – Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe – Unidirektionale Laminat – Zugversuch senkrecht zur Faserrichtung. 1998.

- [109] DIN EN ISO 14129: Faserverstärkte Kunststoffe – Zugversuch an 45° Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve des Schubmoduls in der Lagenebene. 1998.
- [110] DIN EN ISO 14126: Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene. 2000.
- [111] DIN EN ISO 14126: Berichtigung 1 zu DIN EN ISO 14126: 2000. 2003.
- [112] DIN EN 6035: Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren – Bestimmung der Kerbzugfestigkeit an gekerbten und ungekerbten Probekörpern. 1996.
- [113] Hess, H.: Kontinuumsmechanische Simulation des Versagensverhaltens von Faser-Kunststoff-Verbunden. Beim Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Kaiserslautern eingereichte Zulassungsarbeit, 2006.
- [114] Musch, T.: Carbon-Rahmen. TOUR 1/2004, Seiten 14–29.
- [115] Zedler, D.: Alu-Rahmen. TOUR 2/2004, Seiten 16–25.
- [116] Zedler, D.: Die neue Leichtigkeit. TOUR 2/2005, Seiten 14–26.
- [117] Borchers, M.: Punktesieg. TOUR 4/2005, Seiten 44–63.
- [118] Borchers, M.: Werkzeugkunde. TOUR 7/2005, Seiten 14–20.
- [119] Jekel, M.: Nachzügler. TOUR 9/2005, Seiten 44–45.
- [120] Böhlken, F.: Die neuen Siegertypen. Mountainbike 01/2007, Seiten 30–41.
- [121] N.N.: Test Canyon Spectral 8.0, Test Canyon Ultimate CF 9.0. BikeSportNews 01-02/2007.
- [122] Abrate, S.: Impact on Laminated Composites. Appl. Mech. Rev., 44, 1991, Seiten 155–190.
- [123] Abrate, S.: Impact on Laminated Composites: Recent Advances. Appl. Mech. Rev., 47, 1997, Seiten 517–544.
- [124] Cantwell, W. J., Morton, J.: The Impact Resistance of Composite Materials - a Review. Composites, 22, 1991, Seiten 347–362.
- [125] DIN 52306: Kugelfallversuch an Sicherheitsscheiben für Fahrzeugverglasung. 1990.
- [126] DIN EN ISO 6603: Kunststoffe - Bestimmung des Durchstoßverhaltens von festen Kunststoffen. 2000.
- [127] DIN 65561: Luft- und Raumfahrt; Faserverstärkte Kunststoffe; Prüfung von multidirektionalen Laminaten; Bestimmung der Druckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung. 1991.

- [128] DIN EN 6038: Luft- und Raumfahrt - Faserverstärkte Kunststoffe - Prüfverfahren; Bestimmung der Restdruckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung. 1996.
- [129] ASTM D 7136/D 7136 M: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. 2005.
- [130] ASTM D 7137/D 7137 M: Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. 2005
- [131] AITM 1-0010: Determination of Compression Strength After Impact.
- [132] BSS 7260: Compression After Impact.
- [133] <http://solutions.3m.com> (Datum: 12.12.2006)
- [134] Kohmann, P.: Zyklisches Prüfverfahren zur Bestimmung der Lebensdauer von Rennradrahmen. Canyon Werknorm RR-R-Z1-LK1-122006, 2006.

Anhang 1: Untersuchte Rennradrahmengeometrie



Allgemeine Angaben DIN 758-6		Klassifizierung Rennrad		Gewicht	
Hersteller	Modell	Material	Farbe	Preis	Wartung
Rennrad F10-580					
Blatt 1					1/1

Liste betreuter Studien- und Diplomarbeiten

- Cárcoba Zorrilla, Marta, 2004
Implementierung des 3D-Puck Kriteriums in die Finite-Elemente (FE)- Umgebung von Ansys (IVW-Bericht 04-031).
- Koster, Michael, 2005
Konstruktion eines vollgedederten CFK Mountainbikerahmens (IVW-Bericht 05-018)
- Erford, Tobias, 2006
Experimentelle Werkstoffcharakterisierung und –modellierung von kohlenstoff-faserverstärktem Kunststoff (IVW-Bericht 06-021).
- Sommer, Stefan, 2006
Schädigung an rohrförmigen Strukturen durch Impaktbelastung (IVW-Bericht 06-030).