

Felix Ulrich Beck

---

# Verbindungs- technik strukturell tragender CFK-Al- Mischverbindungen im Automobilbau



## Audi-Dissertationsreihe, Band 76





# **Verbindungstechnik strukturell tragender CFK-Al-Mischverbindungen im Automobilbau**

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Felix Ulrich Beck**

geboren in Beckum

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler  
Mitberichter: Prof. Dipl.-Ing. Rudolf Voit-Nitschmann  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang  
Tag der mündlichen Prüfung: 30.01.2013

Institut für Flugzeugbau (IFB) Universität Stuttgart

2013



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2013

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013

978-3-95404-412-2

D93

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage 2013

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

978-3-95404-412-2



# Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen der Kooperation Hochschulinstitute Neckarsulm (HIN) zwischen dem Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart und dem Leichtbauzentrum der Audi AG von Juni 2006 bis August 2009.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn H. Timm vom Leichtbauzentrum der Audi AG in Neckarsulm für die Initiierung und Förderung meiner Arbeit im Rahmen der HIN-Kooperation. Herrn Dr.-Ing. C. Bär von der Audi AG danke ich für die persönliche Betreuung und die anregenden fachlichen Diskussionen.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Drechsler vom Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart. Seine fachliche Kompetenz, Gesprächsbereitschaft und Unterstützung gaben mir viele interessante Impulse während meiner Dissertation.

Auch meinem Mitberichtern Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Mitschang vom Institut für Verbundwerkstoffe der Technischen Universität Kaiserslautern und Herrn Prof. Dipl.-Ing. R. Voit-Nitschmann vom Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart möchte ich meinen Dank aussprechen.

Felix Beck

Stetten, 21. Februar 2013





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>15</b>
<b>Abstract</b>	<b>18</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>21</b>
1.1 Antriebs- und Leistungsbedarf eines KFZ . . . . .	22
1.2 Leichtbauansatz bei Kraftfahrzeugen . . . . .	23
1.3 Mischbauweise im Automobilbau . . . . .	26
1.3.1 CFK-Einsatz im Automobilbau . . . . .	28
1.3.2 Verbindungstechnik im Mischbau . . . . .	31
<b>2 Analyse von Verbindungen</b>	<b>33</b>
2.1 Begriff der Fügbarkeit . . . . .	35
2.2 Katalogisierung und Auswertung . . . . .	36
2.2.1 Konstruktionskataloge . . . . .	37
2.2.2 Fügstellenanalyse . . . . .	38
2.3 Bewertung der Verbindungstechnik . . . . .	42
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>46</b>
3.1 Verbindungstechnik im Automobilbau für FKV . . . . .	46





3.2	Verbindungsszenarien struktureller Verbindungen . . . . .	52
3.2.1	Identifikation geeigneter Bauteile für einen CFK-Einsatz . . . . .	53
3.2.2	Geometrie der Fügebereiche struktureller Verbindungen . . . . .	56
3.2.3	Randbedingungen aus Fertigung und Betrieb . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Fazit und Aufgabenstellung</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>Grundlagenversuche</b>	<b>67</b>
5.1	Werkstoffauswahl der Fügepartner . . . . .	68
5.1.1	Al-Legierung . . . . .	68
5.1.2	FKV-Werkstoff . . . . .	69
5.2	Einflussfaktoren auf die Verbindungstechnik . . . . .	76
5.2.1	Wärmedehnung / $\Delta\alpha$ -Problematik . . . . .	77
5.2.2	Alterung / Korrosion . . . . .	80
5.2.3	Art der Belastung . . . . .	81
5.3	Untersuchung unterschiedlicher Fügeverfahren . . . . .	82
5.3.1	Durchführung . . . . .	84
5.3.2	Auswertung . . . . .	86
5.4	Detaillierte Untersuchung der Einflussfaktoren . . . . .	91
5.4.1	Änderungen zu den bisherigen Untersuchungen . . . . .	93
5.4.2	Versuchsprogramm mit Fügung im Karosseriebau . . . . .	96
5.4.3	Versuchsprogramm mit Fügung in der Montage . . . . .	109
5.4.4	Beurteilung der Ergebnisse . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Optimierungsmaßnahmen</b>	<b>123</b>
6.1	Allgemeine Diskussion möglicher Maßnahmen . . . . .	125
6.2	Z-Verstärkung mit Hilfe der Textiltechnik . . . . .	134
6.3	Festigkeitsuntersuchungen Z-verstärkter Proben . . . . .	139
6.3.1	Grundlagenuntersuchungen Z-verstärkter Proben . . . . .	139
6.3.2	Versuchsprogramm optimierter Proben . . . . .	150



---

6.3.3	Kombinierte Verstärkung . . . . .	155
6.4	Schlussfolgerungen . . . . .	157
<b>7</b>	<b>Numerische Simulation</b>	<b>161</b>
7.1	Modellierung der Fügung . . . . .	164
7.1.1	Grundmodell . . . . .	164
7.1.2	Modellierung der Z-Verstärkung . . . . .	166
7.2	Ergebnisse der Simulation . . . . .	169
7.3	Optimierung mit Hilfe der Simulation . . . . .	176
<b>8</b>	<b>Wissensbasiertes Werkzeug zur Vorauslegung</b>	<b>178</b>
8.1	Allgemeine Herangehensweise . . . . .	179
8.2	Umsetzung in ein anwendbares Werkzeug . . . . .	184
8.2.1	Datenbasis . . . . .	184
8.2.2	Grafische Oberfläche . . . . .	186
8.3	Beispielhaftes Vorgehen . . . . .	189
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>193</b>
9.1	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	193
9.2	Ausblick . . . . .	196
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>198</b>
	<b>Anhang</b>	<b>215</b>
A.1	Versuchsergebnisse der FDS-Klebung: FDSK,K . . . . .	215
A.2	Probengeometrien . . . . .	218
A.3	Simulation der Lackierprozesse (simLack) . . . . .	219
	<b>Lebenslauf</b>	<b>220</b>



# Abkürzungsverzeichnis

1k .....	einkomponentig, bestehend aus einer Komponente
2k .....	zweikomponentig, bestehend aus zwei Komponenten
3D .....	dreidimensional
...,K .....	Fügung im Karosseriebau, z.B. BNK,K
...,M .....	Fügung in der Montage, z.B. BNK,M
a. ....	aufgedoppelt, FKV im Bereich der Fügung mit zusätzlichen Laminatlagen abgestuft aufgedoppelt, z.B. a.CFK
av. ....	aufgedoppelt und verstärkt, FKV im Bereich der Fügung mit zusätzlichen Laminatlagen abgestuft aufgedoppelt und mittels Nähtechnik verstärkt, Kombination aus a. und v., z.B. av.CFK
g. ....	geschliffen, Oberfläche des FKV im Bereich der Fügung mit Schleifpapier aufgeraut, z.B. g.CFK
v. ....	verstärkt, FKV im Bereich der Fügung mittels Nähtechnik verstärkt, z.B. v.CFK
Al .....	Aluminium
ASF .....	Aluminium-Rahmenstruktur (engl. Aluminium Space Frame)
Beam (Element) ....	Balkenelement der FEM
Bi-Phase .....	zweiphasiges Materialmodell der FEM, PAM-Crash Typ 30



---

BM 1494	.....	einkomponentiger, heißhärtender und crashstabiler Strukturklebstoff BetaMate 1494 der Firma DOW
BN	.....	Blindniet
BNK	.....	Blindnietklebung
C	.....	Kohlenstoff (lat. Carbon)
CFK	.....	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (lat. Carbon = Kohlenstoff)
CFRP	.....	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (engl. Carbon Fibre Reinforced Plastics)
CO <sub>2</sub>	.....	Kohlenstoffdioxid
d	.....	Tage (lat. dies oder engl. days)
DCB	.....	doppelter Kragbalken (engl. Double Cantilever Beam)
DMA	.....	dynamisch mechanische Analyse
DP-460	.....	zweikomponentiger, kalthärtender Klebstoff Scotch-Weld DP-460 der Firma 3M
DSC	.....	dynamische Differenzkalorimetrie (engl. Differential Scanning Calorimetry)
FDS	.....	fließlochformende Schraube (engl. Flow Drill Screw)
FDSK	.....	FDS-Klebung
FEM	.....	Finite Element Methode
FKV	.....	Faserkunststoffverbund
FSA	.....	Fügestellenanalyse
GFK	.....	glasfaserverstärkter Kunststoff
Gl.	.....	Glasgewebe



---

GW	Grundwerkstoff
HSN	Halbhohlstanzniet
HTA	Hochleistungskohlenstofffaser vom Typ A (engl. High Tenacity)
HZV	Hochgeschwindigkeitszugscherversuch
ILSS	scheinbare interlaminare Scherfestigkeit nach DIN-EN-ISO 14130 [DIN98c] (engl. Interlaminar Shear Strength)
in-plane	in der Laminebene liegend
Interface	Grenzfläche
KFZ	Kraftfahrzeug
KKT	Klima-Korrosions Test
KLT	klassische Laminattheorie
KTL	kathodische Tauchbadlackierung
MAG	Multiaxialgelege
Mg	Magnesium
Mode I	Schälung
Mode II	Schub- bzw. Längsscherung
Mode III	Querschering
NaCl	Natriumchlorid
NDT	Zerstörungsfreie Prüfung (engl. Non Destructive Testing)
out-of-plane	außerhalb der Laminebene liegend
PES	Polyethersulfon
Pkt.	Punkt
post-failure	nach dem Versagen, Nachbruch... (engl.)



---

Preform	.....	Vorformling (engl.), trockener, nicht ausgehärteter Faservorformling eines Bauteils
PrePreg	.....	vorimprägnierte Fasern (engl. Preimpregnated Fibers)
PVC	.....	Polyvinylchlorid
qi.	.....	quasiisotrop
qst.	.....	quasistatisch
REM	.....	Rasterelektronenmikroskop
Rowing	.....	Faser- / Filamentbündel (engl.)
RTM	.....	Harztransferverfahren (engl. Resin Transfer Moulding)
Shell (Element)	.....	Schalenelement der FEM
Si	.....	Silicium
simLack	.....	simulierter Lackierprozess der automobilen Fertigung
Solid (Element)	.....	Volumenelement der FEM
TFP	.....	maßgerechte Faserpositionierung (engl. Tailored Fibre Placement)
Tied (Element)	.....	Grenzschicht- / Interfacelement FEM, PAM-Crash Typ 303
UD	.....	Unidirektional
VDI	.....	Verein deutscher Ingenieure
WWVV	.....	wissensbasiertes Werkzeug zur Vorauslegung von Verbindungsstellen



## Formelzeichen

$\phi$ .....	Faservolumenanteil [%]
$\rho$ .....	Dichte [ $\frac{g}{cm^3}$ ]
$\sigma$ .....	Zug- bzw. Normalspannung [ $Pa$ ]
$\tau$ .....	Schubspannung [ $Pa$ ]
$\varepsilon$ .....	Dehnung [%]
$A$ .....	Abminderungsfaktor [–]
$C$ .....	absolute Steifigkeit einer Probe [ $N$ ]
$c_w$ .....	Widerstandsbeiwert [–]
$E$ .....	Energie [ $J$ ]
$E$ -Modul .....	Elastizitätsmodul / Steifigkeit [ $Pa$ ]
$F$ .....	Kraft [ $N$ ] (engl. Force)
$f$ .....	Frequenz [ $Hz$ ]
$g$ .....	Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
$G$ -Modul .....	Schubmodul / Schubsteifigkeit [ $Pa$ ]
$k$ -Faktor .....	Reziprok der Steigung der durch lineare Regression über die Oberlast ermittelten Wöhlerlinie im doppelt logarithmischen Maßstab
$l$ .....	Länge [ $mm$ ]
$m$ .....	Masse [ $kg$ ]
$N$ .....	Lastspielzahl [–]
$P$ .....	Leistung [ $W$ ] (engl. Power)
$R_m$ .....	Zugfestigkeit [ $Pa$ ]
$R_{p0,2}$ .....	Streckgrenze [ $Pa$ ]



---

<i>RKZ</i> .....	Referenzkennzahl [–]
<i>RT</i> .....	Raumtemperatur ( $\approx 21^{\circ}\text{C}$ )
<i>T</i> .....	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<i>t</i> .....	Bauteil- / Fügeteildicke [ <i>mm</i> ]
<i>T<sub>G</sub></i> .....	Glasübergangstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<i>tex</i> .....	Faser- bzw. Garnfeinheit [ $\frac{\text{g}}{\text{km}}$ ]
<i>VGG</i> .....	Verbindungsgütegrad [–]





## Indizes

<i>ü</i> .....	Überlappung
<i>Al</i> .....	Aluminium
<i>B</i> .....	Bruch..., Versagens... oder Beschleunigungs...
<i>E</i> .....	Energie
<i>el</i> .....	elastisch
<i>g</i> .....	Gewichts...
<i>ges</i> .....	gesamt
<i>I</i> .....	primäres Lastniveau
<i>I – II</i> .....	Übergang vom primären zum sekundären Lastniveau
<i>II</i> .....	sekundäres Lastniveau
<i>L</i> .....	Luft...
<i>L2</i> .....	Lochaufweitung von 2%
<i>Lm</i> .....	Lochleibungsfestigkeit
<i>LV</i> .....	erstes Lochleibungsversagen
<i>opt</i> .....	optimal
<i>plst</i> .....	plastisch
<i>R</i> .....	Roll...
<i>rot</i> .....	rotatorisch, Rotations...
<i>S</i> .....	symmetrisch
<i>St</i> .....	Steigung-...
<i>W</i> .....	Widerstand

# Kurzfassung

Zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Erhöhung der Fahrzeugagilität gewinnt der Karosserieleichtbau immer mehr an Bedeutung. Dieses geschieht vor dem Hintergrund, dass das Fahrzeuggewicht von einer Fahrzeuggeneration zur nächsten durch erhöhte Sicherheits- und Komfortanforderungen stetig zunimmt.

Ein Ansatz zur Gewichtsreduktion ist die Mischbauweise, auch Multi-Material-Design genannt. Durch die Kombination unterschiedlicher Materialien im Karosseriebau können die Eigenschaften der einzelnen Materialien durch ihren gezielten Einsatz optimal genutzt werden.

In der Mischbauweise kommt der Füge- bzw. Verbindungstechnik eine Schlüsselfunktion zu. Im Gegensatz zur Monobauweise stellt die Mischbauweise mit der Kombination unterschiedlicher Materialien neue Herausforderungen an den Karosseriebau. Um die durch unterschiedliche Materialpaarungen auftretenden Problematiken zu beherrschen, müssen die Phänomene bekannt und abschätzbar sein.

In diesem Zusammenhang werden Mischverbindungen zwischen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) und Aluminium (Al) im automobilen Umfeld untersucht. Es werden im Rahmen der Arbeit ausschließlich strukturell tragende Verbindungen betrachtet. Da für größere Serien nur eine Integration der Bauteile im Karosseriebau sinnvoll ist, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Fügung in diesem Fertigungsabschnitt, d.h. vor dem Lackierprozess. Als Referenz für den aktuellen Stand der Technik dienen Versuche mit Fügung in der Montage.

Es werden unterschiedliche Belastungsphänomene wie die Belastungsart (quasistatisch, schlagartig und dynamisch), Wärmedehnung, Alterung und Korrosion untersucht und im Vergleich zu einer äquivalenten Aluminiumblechverbindung betrachtet. So wird die Grundlage für eine umfassende Bewertung dieser Mischverbindung geschaffen.

Ausgehend von den auftretenden Phänomenen werden Verbesserungsmaßnahmen, u.a. eine Variation der Überlappungslänge oder eine Aufdopplung des Fügebereichs, diskutiert und untersucht. Das Erstversagen und der Versagensfortschritt der Mischverbindungen wird nicht durch ein Versagen der Fügestelle, sondern durch die Delamination der einzelnen Laminatschichten im CFK-Grundwerkstoff bestimmt. Dieses gilt im Besonderen für die Verbindungskonfigurationen mit Fügung im Karosseriebau. Da mit Hilfe der 3D-Verstärkung, bei Laminaten auch Z-Verstärkung genannt, die interlaminaeren Festigkeiten eines Laminats verbessert werden, ist dieses Verfahren besonders für eine Verbesserung der Verbindungseigenschaften geeignet. Der CFK-Fügepartner wird lokal im Fügebereich mit Hilfe der Nähetechnik wie dem Tufting oder dem Doppelsteppstich vor der Infiltration und Konsolidierung verstärkt. Im Speziellen werden der Einfluss unterschiedlicher Verstärkungsfäden bzw. Nähverfahren sowie Stichmuster und -raster betrachtet. Um eine weitere Verbesserung der Verbindungseigenschaften zu erzielen, wird die Verfahrenskombination aus aufgedoppelten Fügebereichen mit zusätzlicher Z-Verstärkung untersucht und das Potential abgeschätzt.

Zur weiteren theoretischen Optimierung wird ein Finite Element Modell der Verbindungskonfiguration entwickelt und mit den Versuchsergebnissen validiert. Die Komplexität besteht hierbei in der Abbildung der mikro- und mesomechanischen Effekte einer Z-Verstärkung bei akzeptablem Rechenaufwand. Mit Hilfe des entwickelten Modells können die auftretenden Versagensmechanismen dargestellt und besser verstanden werden. Es ist so möglich, Vorhersagen über die Effektivität einer Z-Verstärkung zu machen und somit schon mit Hilfe der FEM eine Optimierung der verschiedenen Nahtparameter vorzunehmen.



Abschließend werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen so aufbereitet, dass sie für den Konstrukteur intuitiv nutzbar werden. Dazu wird die Vorgehensweise des wissensbasierten Werkzeugs zur Vorauslegung von Verbindungsstellen (WWVV) entwickelt. Dieses Vorgehen wird mit Hilfe der Programmierumgebung MatLab in Verbindung mit einer grafischen Benutzeroberfläche umgesetzt und dem Konstrukteur durch die Darstellung der wichtigsten Verbindungskennwerte und -merkmale zur intuitiven Bedienung verfügbar gemacht. So wird mit dem WWVV ein Ziel orientiertes Konstruieren unterstützt.



# Abstract

Lightweight construction becomes more and more important in the automotive industries to reduce the CO<sub>2</sub>-emissions and to improve the vehicle dynamics.

This happens against the background of increasing car masses from one car generation to the next caused by higher safety and comfort requirements.

One possibility to reduce the vehicle mass is the so called multi-material-design. The specific properties of different materials can be selective utilized by combination and positioning of the materials in a car body structure. The combination of different materials in a car body structure allows an optimal utilization of the specific material properties. There is weight saving potential if the material is selected in the way that component requirements fit to the material properties, so the material is exploited in an optimal way.

In the multi-material-design there is a special focus on the joining techniques. In comparison to the construction with a single material there are new challenges by joining the different materials. To control the difficulties caused by the combination of different materials it is necessary to know and to appraise the appearing phenomena.

In this context this work investigates joints between carbon fibre reinforced plastics (CFRP) and aluminium (Al) in an automotive environment. The analysed joints are exclusive structural loaded joints. At serial production with large numbers it is reasonable to integrate the components in the bodywork, i.e. before the painting processes. In the final assembly line jointed specimens act as state of the art reference.

The most important phenomena for mixed joints are investigated like load type (quasi-static, high strain rate and swinging loads), heat strain, weathering and corrosion. These results are related to equivalent aluminium sheet joints. In this way a data base will be created which allows a basic and broad benchmark of mixed materials joints.

Based on these test results and the observed failure mechanisms procedures for an advancement of the joint properties are discussed, i.e. a variation of the joining length or extra laminate layers at the joining area to achieve a local reinforcement. The first failure and the failure characteristics are mainly influenced by the delamination of the composite material rather than by a failure at the joint itself. This applies in particular to joint configurations which are carried out in the bodywork. Because 3D reinforcements, so called z-reinforcements for laminates, improve the interlaminar strength of a composite material, they are particularly suitable for the improvement of the joint properties. The fibre reinforced plastics are locally reinforced at the joining areas by using textile production techniques like the tufting or the double locked stitching before infiltrating and consolidation. In particular the influence of different reinforcement yarns, stitching methods, stitching patterns and grids is investigated. For further improvement of the joint properties the combination of using extra layers at the joining area and an additional z-reinforcement of this area is built up and analysed.

For the theoretical consideration and for a better understanding of the failure effects a finite element model of the joint configuration is developed and validated with the experiments. The complexity of the problem is to represent the micro- and mesomechanical effects of a z-reinforcement by creating acceptable calculation effort. By using the results of the finite element simulation it is possible to start an optimization of the different stitching parameters.

To utilize the testing results at the end they are conditioned for an intuitive handling by the constructor. This is done by investigating the proceeding of the knowledge based tool for preliminary joint design. This procedure is implemented into a computer pro-



gram using the MatLab programming environment. There is a graphic surface provided to the user for an easy and intuitive use of the tool. The most important characteristic values and characteristic of the joints are shown in three graphic diagrams which allow a broad estimation of the joint configuration. If the joint properties would not fulfil the requirements the user is able to search target-orientated for alternatives by using the proceeding of this tool.



# 1 Einleitung

Aufgrund der umweltpolitischen Diskussion um die Begrenztheit der Ölressourcen und die Erderwärmung steht die Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen im Fokus der Öffentlichkeit. Besonderen Anlass zur Kritik geben die stetig wachsenden Kohlenstoffdioxidemissionen ( $\text{CO}_2$ ) der Fahrzeuge, da diese wesentlich zum Treibhauseffekt<sup>1</sup> beitragen.

Es besteht gleichzeitig weltweit ein wachsender Bedarf an individueller Mobilität [Pië06], so dass die Anzahl der Kraftfahrzeuge weiter zunimmt und damit die  $\text{CO}_2$ -Emissionen, verursacht durch den Autoverkehr, ansteigen. Im Zuge dessen haben sich die europäischen Automobilhersteller im Vorgriff auf eine gesetzliche Regelung freiwillig verpflichtet, die  $\text{CO}_2$ -Emissionen der Fahrzeugmotoren von  $190\text{g CO}_2$  pro gefahrenem Kilometer auf  $140\text{g CO}_2$  pro km bis zum Jahr 2008 zu reduzieren. Nachdem diese Reduzierung von den Automobilherstellern nicht erreicht werden konnte, soll jetzt durch den Einsatz neuer Technologien ein  $\text{CO}_2$ -Ausstoß von  $125\text{g CO}_2$  pro km für Neufahrzeuge europäischer Produktion ab dem Jahr 2015 erreicht werden [KEGZ08].

Durch die Wünsche der Fahrzeugkunden und gesetzlicher Vorgaben wächst der Bedarf an Komfort, Sicherheit und Agilität (Sportlichkeit) der Fahrzeuge, was die wachsenden

<sup>1</sup>Der Treibhauseffekt wird überwiegend durch den Menschen durch den Ausstoß von Treibhausgasen verursacht. Die Treibhausgase sammeln sich in der Atmosphäre und verhindern die Wärmerückstrahlung von der Erdoberfläche ins All. Das Kyoto-Protokoll von 1998 legt folgende Treibhausgase als besonders relevant für den Treibhauseffekt fest: Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (F-KKW / HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW / PCF) und Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ).



Verkaufszahlen von höher motorisierten und teureren Fahrzeugmodellen belegen. Der Wunsch nach Komfort und Sicherheit erhöht das Fahrzeuggewicht durch steifere Karosserien oder zusätzliche Ausstattung wie z.B. Klimaanlage, elektrische Fensterheber oder Fahrerassistenzsysteme. Dieses führt von einer Fahrzeuggeneration zur nächsten zu einem stetig steigenden Gesamtfahrzeuggewicht. Um trotzdem Sportlichkeit und Fahrzeugagilität zu erreichen, werden immer größere Antriebsleistungen benötigt. Aufgrund des höheren Verbrauchs der stärkeren Motoren nimmt folglich die CO<sub>2</sub>-Emission pro Fahrzeug zu.

### 1.1 Antriebs- und Leistungsbedarf eines KFZ

Die benötigte Antriebsenergie bzw. -leistung eines Kraftfahrzeugs (KFZ) setzt sich aus dem Integral über einen Fahrzyklus der benötigten Vortriebs- bzw. Widerstandskraft  $F_W$  und dem Wirkungsgrad  $\eta_{Antrieb}$  des Motors zusammen [Hal97]. Unter der Annahme

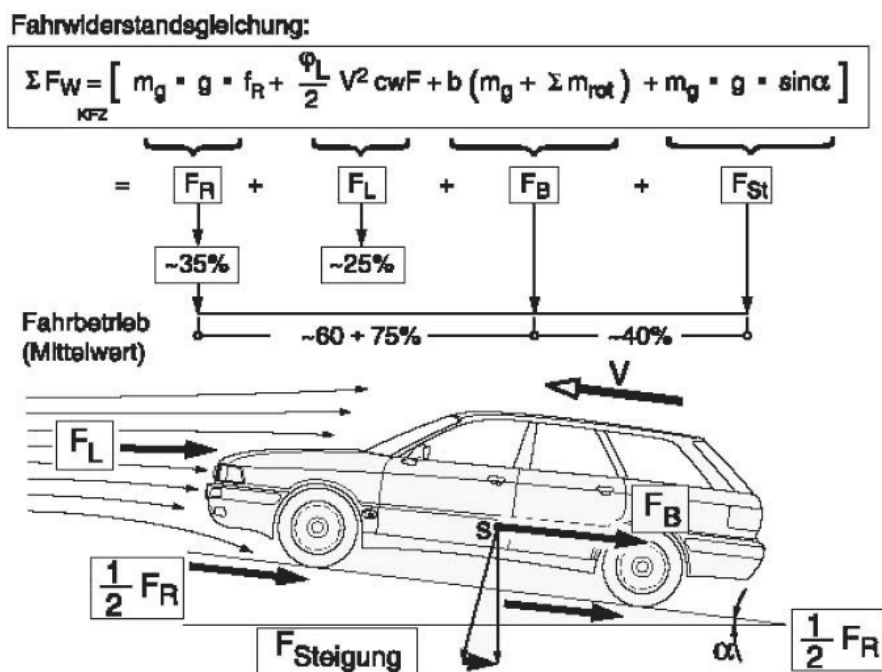


Abb. 1.1: Fahrwiderstand eines Kraftfahrzeugs [Hal97]

eines konstanten Motorenwirkungsgrad ist der Energie- bzw. Leistungsbedarf proportional zum Kraftstoffverbrauch und damit zur CO<sub>2</sub>-Emission. Die Vortriebs- bzw. Widerstandskraft setzt sich aus der Summe der einzelnen Widerstände zusammen (Abb. 1.1, S. 22 und Formel 1.1, S. 23).

$$F_W = F_L + F_R + F_B + F_{St} \quad (1.1)$$

Luftwiderstand	$F_L = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot v^2 \hat{=} 35\% \cdot F_W$
Rollwiderstand	$F_R = m_g \cdot g \cdot \mu_R \hat{=} 25\% \cdot F_W$
Beschleunigungswiderstand	$F_B = a \cdot (m_g + \sum m_{rot})$
Kraft zum Überwinden einer Steigung	$F_{St} = m_g \cdot g \cdot \sin \alpha$

Um den Energie- bzw. Leistungsbedarf des gesamten Fahrzeugs zu erhalten, muss noch die benötigte Kraft für den Betrieb aller sonstigen, vorwiegend elektrischen Verbraucher (z.B. den Generator) bezogen auf ihren jeweiligen Wirkungsgrad addiert werden (Formel 1.2 und 1.3, S. 23).

Energiebedarf	$E = \int_{\text{Zyklus}} \frac{F_W}{\eta_{Antrieb}} + \sum \frac{F_{sonst.}}{\eta_{sonst.}} ds$	(1.2)
---------------	--	-------

Leistungsbedarf	$P = \int_{\text{Zyklus}} \frac{F_W}{\eta_{Antrieb}} + \sum \frac{F_{sonst.}}{\eta_{sonst.}} dv$	(1.3)
-----------------	--	-------

## 1.2 Leichtbauansatz bei Kraftfahrzeugen

Es ist schwer, den Energiebedarf der meisten Verbraucher zu senken, da diese vor allem der Sicherheit (z.B. Fahrzeuglicht) oder dem Komfort (z.B. Klimaanlage) dienen und somit unverzichtbar sind. Es wird allerdings in Formel 1.1 ersichtlich, dass das Fahrzeuggewicht einen großen Einfluss auf die Vortriebs- bzw. Widerstandskraft hat.

Vergleicht man die Massenanteile der einzelnen Fahrzeugkomponenten, sieht man, dass die Karosserie ca. 35 % des Fahrzeugesamtgewichtes ausmacht. Dadurch gewinnt Ka-

rosserieleichtbau immer mehr an Bedeutung. Laut Haldenwanger ist eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission um bis zu 30 % durch ein geringeres Fahrzeuggewicht möglich (Abb. 1.2, S. 24). In der Gewichtsreduktion liegt das größte Einsparpotential für den Kraftstoffverbrauch [Hal06].

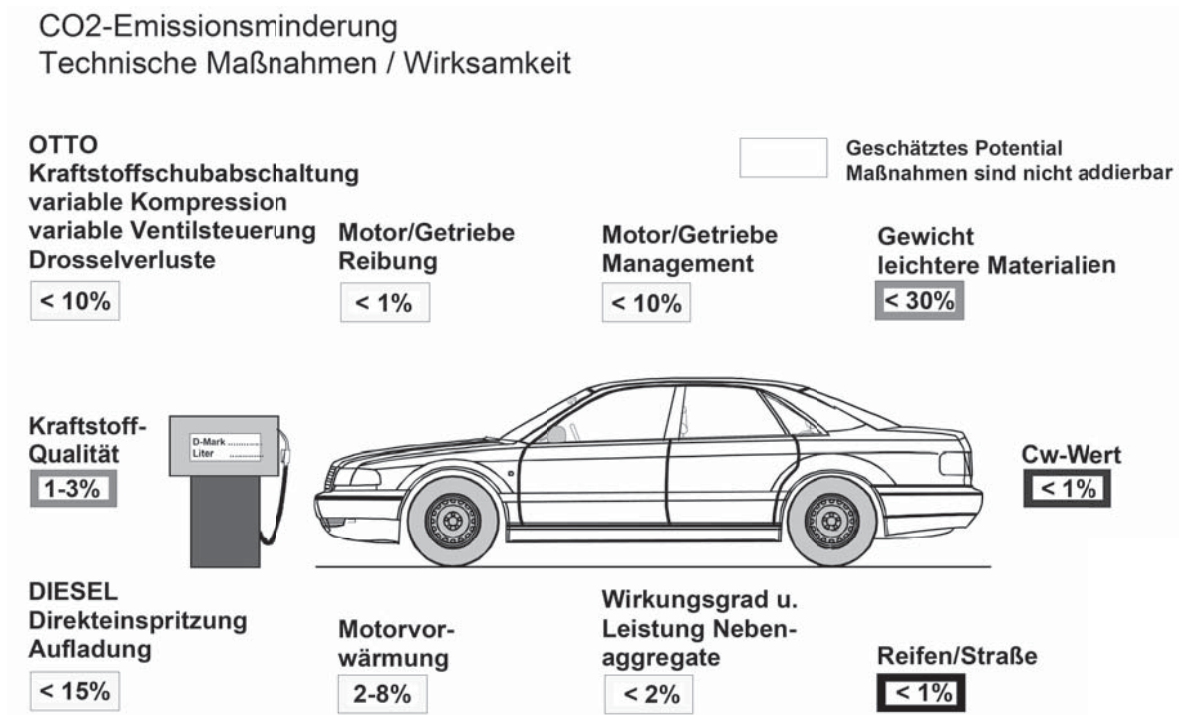


Abb. 1.2: CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung - Technische Maßnahmen / Wirksamkeit [Hal06]

Bei gleicher Motorleistung führt Leichtbau zu einer höheren Fahrzeugagilität, da weniger Kraft zum Beschleunigen benötigt wird. Alternativ kann bei gleicher Agilität die Antriebsleistung verringert werden. Ist die eingesparte Antriebsleistung groß genug, kann ohne Komfortverlust ein nicht so leistungsstarkes und damit leichteres Antriebsaggregat eingesetzt werden. Durch diesen sekundären Effekt, auch Downsizing genannt, verringert sich das Fahrzeuggewicht zusätzlich.

Im Automobilbau haben sich vier Säulen des Leichtbaus herauskristallisiert [Buc05]:

1. konstruktiver Leichtbau

Gestalt- und Topologieoptimierung; Bionik ...

## 2. konzeptioneller Leichtbau

Weglassen verzichtbarer Komponenten, z.B. Reserverad; einfache tragende Strukturen; gleiche Achslastverteilung; ...

## 3. Fertigungsleichtbau

Einsatz von dickenoptimierten Blechen und Profilen; strukturelles Kleben (Hybridfügen)

## 4. stofflicher Leichtbau

Einsatz von Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium (Al), Magnesium (Mg) oder Faserkunststoffverbunde (FKV); Mischbauweise

Da bereits sehr viel Erfahrung in der Karosserieauslegung vorhanden ist, sind die Bauweisen schon ausgereizt und damit nah am Optimum. Das größte Leichtbaupotential steckt im stofflichen Leichtbau, da hier die herkömmlich verwendeten Materialien durch steifere und festere Materialien ersetzt werden. Um die gleichen Aufgaben wie die ursprünglichen Bauteile zu übernehmen, können die Bauteile aus Leichtbauwerkstoffen leichter konstruiert werden. Allerdings sind die Leichtbauwerkstoffe noch sehr teuer und nicht für jeden Einsatz geeignet.

Ebenso geht der Trend immer mehr zu einer gesamtheitlichen Bewertung der CO<sub>2</sub>-Bilanz. Diese erfasst alle CO<sub>2</sub>-Emissionen von der Gewinnung der Rohstoffe über den Betrieb des Fahrzeugs bis hin zum Recycling. Ganzheitlich betrachtet führt nur der Einsatz von Aluminium mit hohem Recyclinganteil zu einer als positiv zu bewertenden CO<sub>2</sub>-Bilanz [SMF<sup>+</sup>06].

Um auch mit anderen Werkstoffen eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz zu erreichen, muss der Werkstoff entsprechend seiner Eignung ideal eingesetzt werden. Eine reine Materialsubstitution ist nicht sinnvoll. So hält die Mischbauweise, auch Multi Material Design genannt, immer mehr Einzug in den modernen Karosseriebau. Durch Mischbauweisen können die Eigenschaften der unterschiedlichen Werkstoffe optimal genutzt werden, so

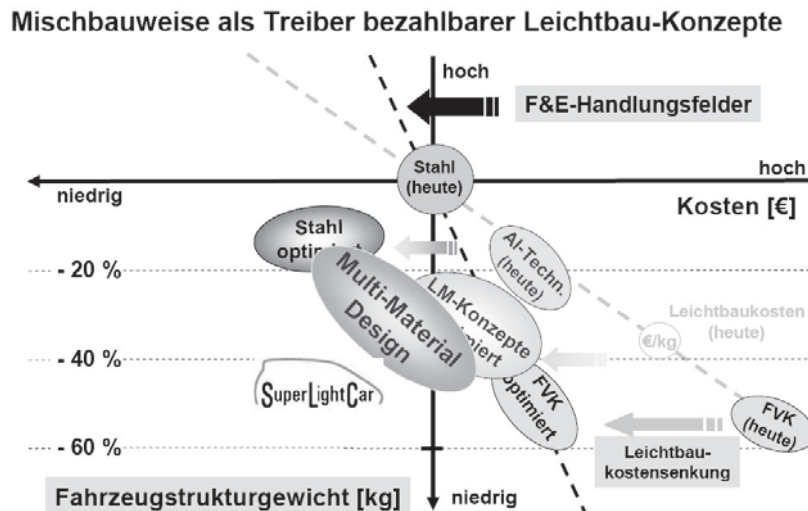


Abb. 1.3: Trends und Entwicklung des Karosserieleichtbaus [Goe07]

dass der Karosserieleichtbau gesamtheitlich die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert und zudem wirtschaftlich ist [Goe07] (Abb. 1.3, S. 26).

Einen weiteren Vorteil bieten sichtbare Leichtbaustrukturen durch einen Imagegewinn für die Firmen wie beispielsweise das aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen hergestellte Fahrzeugdach des BMW M3 CSL. BMW wirbt unter anderem erfolgreich mit einer verbesserten Fahragilität aufgrund des niedrigeren Schwerpunkts [HSL04], obwohl der Effekt bei einer Gewichtseinsparung von 1,1kg zu einer alternativen Aluminiumkonstruktion (5,6kg zur Alternative aus Stahl) vernachlässigbar gering ist [HSL04].

Leichtbau gilt als fortschrittlich. Durch geschickt vermarkteten Leichtbau können die Mehrkosten teilweise oder sogar im Ganzen kompensiert werden.

### 1.3 Mischbauweise im Automobilbau

Im Allgemeinen werden Fahrzeugkarosserien vorwiegend in Monobauweise aus Stahl (z.B. VW Passat) oder Aluminium (z.B. Audi A8) entwickelt und produziert. Fahrzeugkarosserien aus Faserverbundwerkstoffen (z.B. Porsche Carrera GT oder McLaren

SLR) bilden eher die Ausnahme und werden bisher nur in den Kleinserien der Supersportwagen verwendet. Ein Novum in der Automobilindustrie ist die Mischbauweise des aktuellen Audi TT [Qui07].

In der Mischbauweise werden unterschiedliche Materialien für einzelne Bauteile oder Baugruppen so ausgewählt, dass das Potential der einzelnen Werkstoffe optimal ausgenutzt werden kann. Durch die Wahl der Bauteile ist stofflicher Leichtbau im Mischbau immer auch konzeptioneller Leichtbau. Durch lokal geschickten Leichtbau ergeben sich neben dem geringen Gewicht und Kraftstoffverbrauch positive Effekte für das Gesamtfahrzeug. Die Fahrdynamik wird durch Absenken des Fahrzeugschwerpunkts oder durch eine gleichmäßigere Achslastverteilung verbessert. So besteht z.B. der Vorderwagen des Audi TT zum Großteil aus Aluminium, um die Vorderachse zu entlasten, während der Hinterwagen aus Stahl besteht, was eine Gewichtsersparnis im Vergleich zu einer Vollstahlkarosserie von ca. 48% zur Folge hat [Hal06].

Durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften entstehen zusätzliche Herausforderungen für die Fahrzeugkonstruktion z.B. durch unterschiedliche Wärmedehnungen oder Spannungspotentiale. Besonders belastet sind die Krafteinleitungspunkte, da hier die Materialien mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften direkt aufeinander treffen, was dazu führt, dass neben den normalen Lasten zusätzliche durch die Materialpaarung verursachte Belastungen ertragen werden müssen.

Die Erfahrungen, die man mit den klassischen Fügeverfahren gesammelt hat, sind durch die unterschiedlichen Materialpaarungen nicht geschlossen übertragbar. Es ist wichtig, dass die Vorteile des Mischbaus nicht durch ungünstige Fügungen wie erhöhtes Gewicht, geringere Steifigkeit oder Festigkeiten oder aufwändiges / ungünstiges Design im Fügebereich aufgehoben werden.

Um im Automobilbau zu noch steiferen und leichteren Karosserien zu gelangen, ist nach dem Einsatz von Aluminium der Einsatz von hochfesten Stählen oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) der nächste Schritt. Durch die hohe Steifigkeit der

Kohlenstofffasern sowie die Möglichkeit, anisotrop zu konstruieren, bietet der Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ein hohes Potential. Weitere Potentiale für eine Einsatz von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen bietet auch das hohe Energieabsorptionsvermögen dieses Werkstoffs für Crashelemente [BM05].

Vor allem für Kleinserien eignen sich Faserverbundbauteile. Gerade bei kleinen Stückzahlen ist der Einsatz von FKV-Bauteilen durch die geringen Investitionskosten und durch eine mögliche Funktionsintegrität wirtschaftlich, weil in der Faserverbundbauweise Bauteilgeometrien möglich sind, die sich in Metall nicht oder nur mit großem Aufwand herstellen lassen. So konnte bei der Heckklappe des Lamborghini Gallardo Spyder neben der Gewichtsreduktion von 30% eine Teilerreduktion von 11 auf 2 Teile im Vergleich zur Aluminiumbauweise erreicht werden [ACE08].

Die fasergerechte Krafteinleitung in FKV-Bauteile stellt im automobilen Mischbau durch die hohen Stückzahlen, die automatisierten Fertigungstechniken und den hohen Kostendruck eine besondere Herausforderung dar.

### 1.3.1 CFK-Einsatz im Automobilbau

Bisher werden Komponenten aus endlosfaserverstärkten Verbundkomponenten nur im Supersportwagenbereich und in Kleinserien verbaut. Abgesehen von Monocoque Strukturen, die keinen klassischen Mischbau darstellen, werden nahezu alle Kohlenstofffaserverbundbauteile als Montageteile in Karosseriestrukturen integriert. Beim größten Teil der Faserverbundteile handelt es sich um nicht tragende Anbau- und Verkleidungsteile wie z.B. das R8 Side-Blade. Strukturell tragende Teile werden ebenfalls in der Montage mit einem sehr geringen Automatisierungsgrad verbaut. Als Beispiel ist hier der Aston Martin Vanquish mit einer Stückzahl von ca. 300 Fahrzeugen pro Jahr zu benennen [Her04], bei dem die A-Säule, die Domstrebe im Motorraum und der Tunnel aus Faserverbundwerkstoffen gefertigt sind.

Eine Besonderheit stellt die Hybridisierung auf Bauteilbasis des BMW Hydrogen 7 dar [BMW06]. Aufgrund des Wasserstoffantriebs erhöht sich das Fahrzeuggewicht erheblich. Deshalb werden bei dieser Kleinserie die Stahlkomponenten gezielt mit aufgeklebten CFK-Strukturen verstärkt, um so eine Neuentwicklung von Fahrwerk und Getriebe zu vermeiden. Alle Fahrzeuge mit endlosfaserverstärkten Verbundbauteilen werden in Kleinserien wenig bis gar nicht automatisiert gefertigt.

Für den Einsatz von endlosfaserverstärkten Faserverbundwerkstoffen in einer Großserie sind die heutigen Herstellungsverfahren der begrenzende Faktor. Aufwändig ist, dass zunächst die Faserhalbzeuge konfektioniert und in einem anschließenden Arbeitsschritt konsolidiert werden müssen. Dabei werden im Normalfall bei flächigen Bauteilen zunächst die einzelnen Laminatlagen aus Multiaxialgelegen (MAG) und Geweben zugeschnitten und anschließend im Harztransferverfahren, dem sogenannten Resin Transfer Moulding (RTM), mit Kunstharz infiltriert und ausgehärtet [Pot97]. Nach dem Entformen der Bauteile muss ein Beschnitt bzw. ein Besäumen der Bauteilkanten stattfinden, was einen weiteren aufwändigen Arbeitsschritt bedeutet. Eine komplette Automatisierung dieser Arbeitsschritte stellt sich als schwierig dar, so dass in der Produktion von FKV-Bauteilen noch große Anteile an Handarbeit nötig sind.

Durch eine Teilautomatisierung können beispielsweise bei der Herstellung des Kohlenstofffaserverbunddaches des BMW M3 CSL und M6 Stückzahlen von etwa 50 Stück pro Tag erreicht werden. Zusätzlich besteht der BMW M6 Stoßfänger aus einem geflochtenen Kohlenstofffaserverbundwerkstoff, wodurch eine Gewichtsersparnis der Stoßfänger von 20% vorne und 40% hinten in der Karosserie erreicht wird. Hier wird ein Sandkern in mehreren Schichten mit trockenen Kohlenstofffaserrowings umflochten. Nach der Infiltration und Konsolidierung der so entstandenen Preform wird der Sandkern entfernt. Durch das textile Fertigungsverfahren des Flechtens wird so ein extrem leichter und steifer Hohlprofilträger effizient hergestellt. Die Montage der Faserverbundkomponenten ist ohne Zeitverlust in die Fertigungsreihe des BMW 6er Modells nahezu vollautomatisiert integriert [BMW05].



Im Gegensatz zur teilautomatisierten Herstellung des Faserverbunddachs bei BMW wird die Heckklappe des Lamborghini Gallardo Spyder [ACE08] zwar nach dem gleichen Verfahren, jedoch mit großem Aufwand größtenteils in Handarbeit hergestellt. Hier beträgt die maximale Stückzahl ca. 1500 Teile pro Jahr. Bei so geringen Stückzahlen werden diese Komponenten wenig bis gar nicht automatisiert gefertigt und montiert, da die Automatisierung in der Herstellung von FKV-Bauteilen nur mit großem Aufwand zu realisieren ist.

Durch neue Fertigungstechniken und -kapazitäten in der Luftfahrtindustrie nähern sich die Stückzahlen bestimmter Komponenten im Flugzeugbau immer mehr den Stückzahlen im Automobilbau an [Her04], so dass die im Flugzeugbau entwickelten Technologien für Faserverbundwerkstoffe sich mehr und mehr auch für den Einsatz im Automobilbau eignen. Die Fügeverfahren aus der Luftfahrt sind allerdings nicht geschlossen auf die überwiegend automatisierte automobiler Fertigung übertragbar. Ebenso sind die zurzeit im Automobilbau verfügbaren Fügeverfahren nur bedingt für Verbindungen mit Faserverbundbauteilen einsetzbar.

Um wirtschaftlich zu fügen, muss sich auch die Fügetechnik in den jetzigen nahezu vollautomatisierten Automobilbau einfügen. Viele strukturell tragende Bauteile können sinnvoll nur im Karosseriebau in das Fahrzeug eingebracht werden. Abgesehen von den verstärkenden Strukturen des BMW Hydrogen 7 werden bis heute keine Faserverbundkomponenten im Karosseriebau integriert.

Es ist notwendig, mögliche Fügeverfahren im Hinblick auf automobiler Anforderungen zu analysieren und zu bewerten, um die Eignung und die Einflussfaktoren, die sich aus der Mischverbindung ergeben, abschätzen zu können.

Aufgrund der vielen Freiheitsgrade für die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen beginnt die Entwicklungskette eines Bauteils bei der Halbzeugherstellung [HS03], was direkt auf die Verbindungstechnik übertragen werden kann.

### 1.3.2 Verbindungstechnik im Mischbau

Durch die Forschungen der Luft- und Raumfahrttechnik wurden bereits sehr viele Verbindungen und Konfigurationen untersucht, woraus allgemeine Designregeln abgeleitet werden konnten [Arb03] [US 02].

Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren (z.B. Faser- und Matrixtyp, Lagenaufbau und -dicke, Verbindungselement) lassen sich nur grobe Tendenzen aufzeigen. Detaillierte Aussagen sind selten auf andere Materialien und Konfigurationen übertragbar. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den Automobilbau ist zusätzlich sehr gering, da vor allem luftfahrttypische Verbindungsszenarien wie z.B. mehrreihige Nietverbindungen oder die punktuell sehr hoch belasteten Anschlüsse von Rotorblättern untersucht wurden. Diese Konfigurationen sind im automobilen Umfeld meist aufgrund ihres Aufwands in der Herstellung, Geometrie etc. und der geringen Automatisierbarkeit höchstens in Kleinserien oder gar nicht realisierbar.

Bahn- bzw. nahtförmige strukturelle Mischverbindungen werden im Flugzeugbau vor allem durch Kleben oder Nieten realisiert. Häufig werden aus Fertigungs-, Festigkeits- und Sicherheitsgründen die beiden Verbindungstechniken kombiniert. Dabei erweist sich die Qualitätssicherung der Verklebung als besondere Herausforderung. Hier wird ein großer Aufwand für die Klebflächenvorbehandlung und die anschließende zerstörungsfreie Prüfung (NDT, Non Destructive Testing) der Verbindung betrieben, der im Automobilbau so nicht zu realisieren ist.

Mischverbindungen im Automobilbau mit einem nicht metallischen Fügepartner sind in der Regel nicht strukturell bzw. semi-strukturell tragende Verbindungen. Vor allem aus Gründen unterschiedlicher Wärmeausdehnungen der Materialien ( $\Delta\alpha$ -Problematik) kommt meist das Dickschichtkleben zum Einsatz, so dass Wärmespannungen über ein Schieben in der relativ dicken Klebschicht reduziert werden. Als Beispiel kann hier das Einkleben der Fahrzeugscheiben genannt werden.

Automobilspezifische Untersuchungen betrachten die Mischverbindung von Aluminium und Kohlenstofffaserverbundstrukturen nur als einen Teilaspekt [BMK<sup>+</sup>03] und beschäftigen sich lediglich mit der Machbarkeit verschiedener Verbindungsverfahren [HBD<sup>+</sup>04]. Es wurden quasistatische (qst.), schlagartige und dynamische Untersuchungen vor und nach Alterung durchgeführt. Die Machbarkeit der verschiedenen Verbindungsarten konnte nachgewiesen und Tendenzen für deren Festigkeit aufgezeigt werden.

Eine umfassende Bewertung und die Ableitung von Designregeln waren und sind aber aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren nicht möglich, da die bisherigen Untersuchungen nur für sehr spezielle Materialkombinationen durchgeführt wurden. Eine genaue Versagensanalyse und Optimierung zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften sowie eine Untersuchung unterschiedlicher Einflussfaktoren sind mit Ausnahme der Betrachtung verschiedener Klebstoffe nicht aufgezeigt worden. Die gewonnenen Messergebnisse sind nicht so für den Konstrukteur aufbereitet worden, dass sie ihm direkt in der täglichen Arbeit helfen.

## 2 Analyse von Verbindungen

Nach Norm DIN 8580 [DIN03a] zählt das Fügen und somit die Verbindungstechnik zu den Hauptgruppen der Fertigungsverfahren. Das Fertigungsverfahren Fügen wird in der Norm DIN 8593-0 [DIN03b] beschrieben und in weitere neun Untergruppen unterteilt. Diese Untergruppen werden in den Teilen DIN 8593-1 bis 9 (Abb. 2.1, S. 34) beschrieben und nach ihrem Wirkprinzip und ihrer Herstellungsart eingeteilt und gegliedert. Der Begriff des Fügens ist in der Norm DIN 8593-0 wie folgt definiert:

„Das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.“

Diese Aussage bedeutet, dass zwei oder mehrere Körper entweder punktuell oder flächig miteinander verbunden werden. Für den technischen Einsatz wird der Begriff der Verbindung oder Fügung in der VDI Richtlinie 2232 [VDI04] konkreter beschrieben:

„Verbindungen sind Zusammenschlüsse von zwei oder mehreren widerstandsfähigen Körpern (bzw. den beiden Enden eines Körpers), die eine Trennung der Körper auch unter Betriebskräften verhindern.“

Dabei werden die Körper als Fügepartner und die Verbindung als Fügeverbindung oder kurz als Fügung bezeichnet. Die VDI Norm definiert zusätzlich den Zweck der Lastübertragung über eine Verbindungsstelle.

Laut DIN 8593-0 zählen zusätzliche Handhabungs- und Hilfsvorgänge sowie das Messen und Prüfen nicht mehr zum Fügen, sondern fallen unter den Begriff Montage. Für eine umfassende Beurteilung einer Fügung ist es unverzichtbar, diese einzelnen Schritte mit zu betrachten, da hier im Vergleich zur eigentlichen Fügung ein wesentlich größerer Aufwand erforderlich ist, um eine reproduzierbare Qualität der Verbindungen zu erreichen. Aus diesem Grund werden in den folgenden Kapiteln die eigentliche Fügung, und die zugehörigen Handhabungs- und Hilfsvorgänge sowie das Messen und Prüfen für eine umfassende Bewertung gemeinsam betrachtet und mit dem Begriff Fügeverbindung oder kurz Fügung beschrieben.

Fügeverbindungen, bei deren Herstellung eine einzelne Verbindungstechnik angewandt wird, werden elementar genannt. Bei gleichzeitigem Einsatz mehrerer Verbindungstechniken, z.B. einer Kombination aus kleben und nieten, wird die Fügung als kombiniert gefügt bezeichnet.

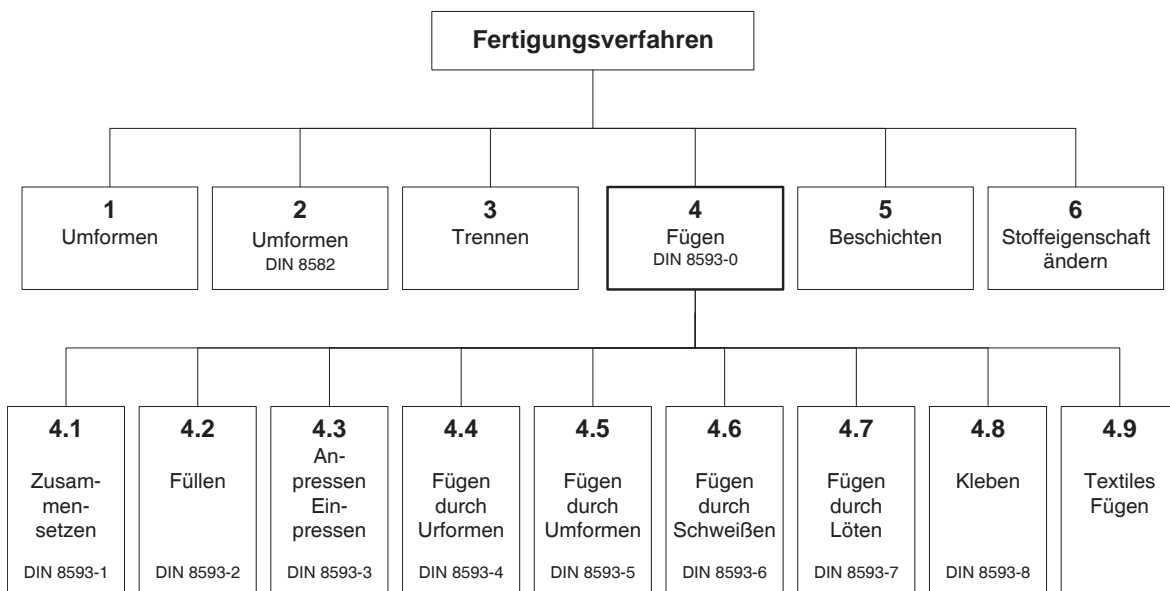


Abb. 2.1: DIN 8593-0: Übersicht über die Fertigungsverfahren [DIN03b]

## 2.1 Begriff der Fügbarkeit

In Anlehnung an die Normen DIN 8514 (Lötbarkeit) [DIN06] und DIN 8528 (Schweißbarkeit) [DIN73] kann die Fügbarkeit abgeleitet und definiert werden [Rie03]. Die Fügbarkeit zwischen zwei oder mehreren Fügepartnern besteht, wenn durch ein konstruktives Verfahren oder Element die Möglichkeit besteht, eine feste Verbindung zwischen diesen Körpern herzustellen.

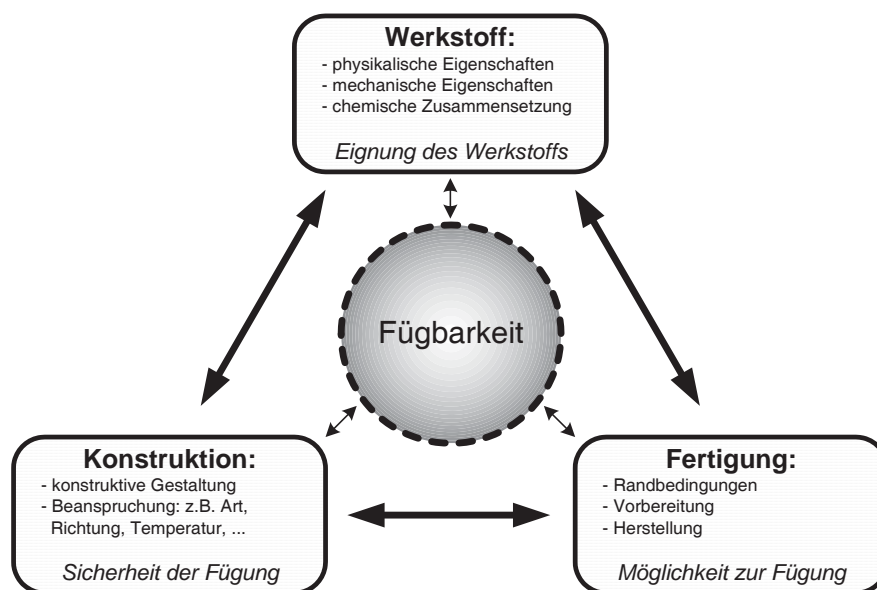


Abb. 2.2: Fügbarkeit

Ob sich ein Verfahren zum Fügen eignet und ob sich zwei oder mehrere Fügepartner verbinden, also fügen lassen, kann durch eine Untersuchung auf Fügbarkeit herausgefunden werden. Die Fügbarkeit zwischen Bauteilen wird im Wesentlichen durch drei sich gegenseitig beeinflussende Faktoren bestimmt (Abb. 2.2, S. 35). Diese Einflussfaktoren sind:

### 1. Werkstoff - Eignung zur Fügung

Die Werkstoffe der Fügepartner müssen sich alleine oder in Kombination für das gewählte Fügeverfahren eignen. Das Fügeverfahren des Schweißens eignet sich z.B. nicht für Werkstoffe, die nicht zerstörungsfrei aufschmelzbar sind. Alle Ma-

terialien, sowohl der Fügepartner als auch die Fügehilfselemente oder die verwendeten Klebstoffe müssen dem Fügeprozess und dem weiteren Fertigungsprozess unbeschadet oder mit kalkulierten Veränderungen standhalten.

## 2. Fertigung - Möglichkeit zur Fügung

Damit Bauteile ffügbar sind, muss in der Fertigung eine Möglichkeit zur Fügung vorhanden sein. Die geplanten Fügeschritte müssen unter den gegebenen Randbedingungen durchführbar sein. Beeinflussende Randbedingungen sind unter anderem die Zugänglichkeit, Lagetoleranzen der Bauteile zueinander, die Umweltbedingungen wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur, die Reihenfolge der Fügeschritte und der gesamten Fertigung. Aber auch Taktzeiten oder Automatisierbarkeit sind zu erfüllende Kriterien. Zusätzlich ist zu prüfen, ob sich durch eine geschickte Reihenfolge der Fertigungsschritte Synergieeffekte ergeben, um Kosten und Zeit sparen zu können. So wird z.B. im Automobilbau die Wärme der Trocknungsöfen für die Lackierung zum Auslagern des Aluminiums und zum Aushärten von Klebstoffen ohne zusätzlichen Energiebedarf genutzt.

## 3. Konstruktion - Sicherheit der Fügung

Im Lastenheft sind die Belastungen für die gesamte Karosserie zu definieren. Aus diesen Anforderungen wird die Konstruktion der Fügeverbindung abgeleitet, um die geforderten Betriebslasten unter den gegebenen Bedingungen ohne ein Separieren der Bauteile zu ermöglichen.

## 2.2 Katalogisierung und Auswertung

Um Fügungen vergleichen und bewerten zu können, müssen diese aufgrund der vielfältigen Einflüsse verallgemeinert und charakterisiert werden. Zur Katalogisierung können die Verbindungsart, also das Wirkprinzip oder auch die Verbindungsgeometrie oder der Nutzen der Verbindung zur Abstraktion herangezogen werden. Zum Vergleich und zur

Auswahl einer Verbindungstechnik muss ein ganzheitliches Bewertungssystem genutzt werden. So kann ein Informationsgewinn erreicht werden, der über den Erfahrungsschatz des Konstrukteurs hinausgeht. Dieses Bewertungssystem muss unterschiedliche Eigenschaften der Verbindung in Form von vergleichbaren Kennzahlen abbilden, die dann in einer Datenbank in Relation zu anderen Verbindungstechniken gesetzt werden können. Ein einfaches Beispiel hierfür ist der Vergleich der übertragbaren Kraft pro Verbindungspunkt eines Niets und eines Schweißpunktes bei gleichen Randbedingungen, wie der Prüfmethode oder den Materialien.

Mit den Konstruktionskatalogen des Vereins deutscher Ingenieure (VDI) und der Fügstellenanalyse (FSA) des Lehrstuhls für Fügetechnik und Montage der Technischen Universität Dresden existieren zwei grundlegende Methoden, Verbindungseigenschaften zu katalogisieren, zu bewerten und zu vergleichen.

### 2.2.1 Konstruktionskataloge

In der VDI-Richtlinie 2232 (Methodische Auswahl fester Verbindungen - Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen) [VDI04] sind die Verbindungen erst nach Freiheitsgraden und anschließend nach ihrem Wirkprinzip (Form-, Kraft- und Stoffschluss) charakterisiert und eingeordnet. In den Konstruktionskatalogen sind die Verbindungen formalisiert und einsortiert. Die Kataloge des VDI sind nach folgenden Inhalten strukturiert:

1. **Lösungen** für bestimmte Funktionen im Lösungskatalog:  
Schraubverbindungen, Nietverbindungen, ...
2. **Regeln** zur Dimensionierung und Gestaltung im Operationskatalog:  
Auslegung von Schraubverbindungen, ...
3. **Elemente** der Verbindungen im Objektkatalog:  
Schrauben, Muttern, ...



Die drei einzelnen Kataloge sind untereinander durch Querverweise verknüpft, damit Verbindungsproblematiken von verschiedenen Seiten angegangen werden können. Aus den Konstruktionskatalogen kann dann durch ein fünfphasiges Vorgehen eine passende Verbindungskonfiguration herausgefiltert werden.

Die Systematik der Konstruktionskataloge kann alle Arten von Verbindungen, Dimensionierungsregeln und Verbindungselementen erfassen. Die Erfassung sämtlicher Verbindungskonfigurationen und -kombinationen und der möglichen Einflussfaktoren ist jedoch aufgrund ihrer Anzahl unmöglich. Die Verknüpfung der verschiedenen Kataloge untereinander ist ebenfalls schwierig umzusetzen, da sich Verbindungseigenschaften meist nicht konkret mit Kennwerten abbilden oder durch eindeutig erkennbare Regeln verknüpfen lassen.

Die Herangehensweise an Verbindungsproblematiken mit Hilfe der Konstruktionskataloge des VDI bildet ein akademisches Gerüst, in dem sich theoretisch sämtliche Fälle abbilden lassen. Für die Praxis sind diese Konstruktionskataloge jedoch ungeeignet. Die für die Konstruktionskataloge benötigte Datenbank und die damit zu ermittelnde Datenmenge ist zu umfangreich, um überhaupt nur die wichtigsten Verbindungstechniken mit den wichtigsten Randbedingungen abbilden zu können. Neue Verbindungselemente und -typen müssen mit einem ebenso großen Aufwand eingepflegt werden.

### 2.2.2 Fügstellenanalyse

Zur Erfassung und Bewertung von Verbindungen abstrahieren Wittke und Füssel [WF96] die Verbindungen auf eine von den Konstruktionskatalogen unterschiedliche Art. Zuerst werden die zu fügenden Materialkombinationen betrachtet, um anschließend die Verbindungen formal nach ihrer Art zu trennen (elementare und kombinierte Fügung).

Vom Wirkprinzip der Verbindung lassen sich funktionsbedingte Grundeigenschaften wie Dichtheit oder elektrische Leitfähigkeit direkt ableiten, die dann auf Verbindungen

ähnlicher Paarung und Wirkart übertragbar sind (Tab. 2.1, S. 39). So werden die ersten Eigenschaften qualitativ erfasst und katalogisiert.

Tab. 2.1: Funktionsbedingte Grundeigenschaften elementarer Fügungen [WF96]

Funktionsbedingte Grundeigenschaften	Elementare Fügeverbindungen		
	formschlüssig	kraftschlüssig	stoffschlüssig
Festigkeit			
thermische Beständigkeit			
elektr. / therm. Leitfähigkeit			
Dichtheit			
Korrosionsbeständigkeit			
Sicherheit gegen Lösen			
Lösbarkeit			

Die Katalogisierung nach Wittke und Füssel ist übersichtlicher als die komplexen Konstruktionskataloge des VDI. Sie kann jedoch aus den zuvor dargelegten Gründen ebenso wenig sämtliche Verbindungskonfigurationen und -kombinationen abbilden. Es ist jedoch vorteilhaft, aus der Art der Fügung möglichst viele Eigenschaften abzuleiten, um so verschiedene Gruppen von Verbindungstechniken aufgrund der benötigten Anforderungen schon frühzeitig auszusortieren. Zur Anlage einer Datenbank ist ebenso wie bei den Konstruktionskatalogen eine qualitative Abschätzung und Erfassung der Verbindungseigenschaften nötig und schwierig.

Eine Pragmatisierung der Konstruktionskataloge ist die sogenannte Fügstellenanalyse (FSA) des Lehrstuhls für Füge-technik und Montage der Technischen Universität Dresden. Grundlage der Fügstellenanalyse ist die Vorgehensweise von Wittke und Füssel. Sie läuft als Verfahren in mehreren Schritten ab, ähnlich der Verbindungsauswahl in den Konstruktionskatalogen.

Im ersten Schritt wird versucht, möglichst alle Anforderungen an die Verbindung zusammenzutragen. Dies ist nicht unproblematisch, da alle auftretenden Lasten häufig

aufgrund unterschiedlicher Lastfälle und des komplexen Zusammenspiels mehrerer Bauteile qualitativ und quantitativ nicht bekannt oder erfassbar sind. Dies gilt vor allem für die frühen Konstruktionsphasen, in denen im optimalen Fall die Verbindungstechnik bereits zu berücksichtigen ist.

Aufgrund aller zusammengetragenen Informationen wird eine Fügeverbindung bzw. deren Konfiguration ausgewählt. Anschließend werden die ausgewählte Verbindungskonfiguration und die vorhandene Prozess- und Anlagentechnik auf ihre Einsetzbarkeit hin technologisch bewertet. Diese Schritte werden iterativ so oft wiederholt, bis eine geeignete Verbindung gefunden ist.

Um dieses Verfahren zu automatisieren, wird vom Lehrstuhl für Füge- und Montage der Technischen Universität Dresden in Kooperation mit der Audi AG die datenbankgestützte Fügstellenanalyse entwickelt. Sie ist eine Weiterentwicklung und Zusammenfassung der klassischen Konstruktionsrichtlinien.

Über Eingabemasken werden Anforderungen abgefragt und anschließend aus einer Datenbank geeignete Füge- und Montageverfahren vorgeschlagen. Dabei sind die Eigenschaften von interessanten Verbindungen mittels Kennzahlen in dieser Datenbank erfasst. Um eine Vergleichbarkeit der Fügungen zu gewährleisten, werden die Kennwerte mittels normierter Probekörper generiert. Die Ergebnisse der Proben werden in die Datenbank eingetragen und anschließend nach den Anforderungen gewichtet.

Aufgrund der gewichteten Messergebnisse sind Einflussfaktoren wie z.B. Maximalkraft oder Alterungsbeständigkeit zumindest bedingt vergleichbar. Es werden zwar nur die Ergebnisse genormter Probekörper verglichen, aber so ist erstmals eine Basis geschaffen, um verschiedene Verfahren direkt miteinander vergleichen zu können. Da eine genaue Kenntnis der Einflussfaktoren während der Vorauslegung meist aber nicht möglich ist bzw. sich die Werte der genormten Zugproben nicht geschlossen auf die fertigen Bauteile übertragen lassen, kommt es hier auf Schätzwerte und die Erfahrung des auslegenden Ingenieurs an.

Die Konstruktionskataloge des VDI und die Katalogisierung nach Wittke und Füssel können die Vielzahl der auf dem Markt vorhandenen Verbindungsverfahren weder abbilden noch den Einfluss komplexer Geometrien berücksichtigen. Weiter wird beim Konstrukteur kein Verständnis für das Tragverhalten der Verbindung generiert, so dass er nur die in der Datenbank gegebenen Werte verwenden kann. Ist kein passendes Fügeverfahren in der Datenbank vorhanden, fällt es dem Konstrukteur aufgrund des nicht genau bekannten Tragverhaltens schwer, eine Anpassung der Fügestelle vorzunehmen.

Hinzu kommt, dass mit dem heutigen Stand der Technik ein vollständiges Abbilden der Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen nicht möglich ist. Folglich können die Einflussfaktoren für unterschiedliche Verbindungen ebenfalls nicht umfassend aufgezeigt und abgebildet werden.

Mit der Fügstellenanalyse ist ein System geschaffen, das den Entwickler und den Konstrukteur unterstützt, indem es wichtige Anhaltspunkte gibt. Die Fügstellenanalyse stellt mit Sicherheit einen pragmatischeren Weg zur Katalogisierung dar als die Konstruktionskataloge. Dieses geschieht durch die Bewertung von Verbindungen aufgrund der Vergleichbarkeit von Versuchen mit Normkörpern. Anschließend überträgt der Konstrukteur mit Hilfe seiner Erfahrung die Ergebnisse der normierten Probekörper auf die reale Anwendung.

Neue Fügeverfahren können im Gegensatz zu den Konstruktionskatalogen des VDI sofort durch den direkten Vergleich abstrahierter Normgeometrien in das System eingepflegt werden.

Das Kernproblem bleibt bei allen Systematiken die Beschaffung der benötigten Datenbank. Eine vergleichbare Abbildung der wichtigsten Verbindungsarten und Einflussfaktoren stellt einen erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand dar. Die größte Herausforderung liegt darin, möglichst alle Einflussfaktoren der Fügbarkeit (Kap. 2.1, S. 35) in den Datenbanken zu berücksichtigen, um die Verbindung umfassend vergleichen und bewerten zu können und so Arbeitsschritte zu optimieren.

## 2.3 Bewertung der Verbindungstechnik

Um in dieser Arbeit mit dem bestehenden System der datenbankgestützten Fügstellenanalyse kompatibel zu sein, muss sich die Bewertung der Verbindungsstellen an diesem System orientieren. Hinter der datenbankgestützten Fügstellenanalyse steckt ein komplexes Gleichungssystem, das es ermöglicht, die Messergebnisse der Versuche in vergleichbare Kennzahlen zu übersetzen [Ram04]. Bewertet wird in sechs unterschiedlich gewichteten Kriteriengruppen mit unterschiedlichen Zielkriterien (Tab. 2.2, S. 42).

Tab. 2.2: Bewertungs- und Zielkriterien der datenbankgestützten FSA [Ram04]

Kriteriengruppen	Zielkriterien
Verbindungssicherheit	statisch
	dynamisch
	schlagartig (Crash)
Ökonomie	
Funktionen	elektrische Leitfähigkeit
	thermische Leitfähigkeit
	Korrosion
	Optik
	Instandsetzung
	Nacharbeit
Leichtbau	
Fertigung	Toleranzen
	Verfügbarkeit
	Zugänglichkeit
	Systemintegrierbarkeit
	Automatisierbarkeit
Ökologie	

Eine Verbindung ist erst dann erfassbar, wenn ein gewisser Rahmen an Versuchen durchgeführt wurde und die Ergebnisse in die Datenbank eingetragen sind. Um mit akzeptablem Aufwand während des Versuchsprogramms dieser Arbeit Optimierungsschritte durchführen zu können, werden mit Schwerpunkt auf die mechanischen Eigenschaften Kennzahlen eingeführt, die die wesentlichen Verbindungseigenschaften widerspiegeln. Folgende Kennzahlen werden definiert:

- **Verbindungsgütegrad (VGG):** Die Verbindungen werden jeweils auf ein monolithisches Bauteil aus CFK bzw. Al bezogen.
  - absolute Steifigkeit:  $VGG_c = \frac{c_{Verbindung}}{\text{Min}(c_{Al}, c_{CFK})}$
  - Festigkeit:  $VGG_B = \frac{F_{B_{Verbindung}}}{\text{Min}(F_{B_{Al}}, F_{B_{CFK}})}$
  - Energieaufnahme:  $VGG_E = \frac{E_{Verbindung}}{\text{Min}(E_{Al}, E_{CFK})}$
- **Referenzkennzahl (RKZ):** Eine Mischverbindung, z.B. eine CFK-Al-Verbindung wird auf die entsprechende Al-Al-Verbindung bezogen.
  - absolute Steifigkeit  $RKZ_c = \frac{c_{CFK-Al}}{c_{Al-Al}}$
  - Festigkeit:  $RKZ_B = \frac{F_{B_{CFK-Al}}}{F_{B_{Al-Al}}}$
  - Energieaufnahme:  $RKZ_E = \frac{E_{CFK-Al}}{E_{Al-Al}}$
- **Abminderungsfaktor (A) durch eine Einflussgröße:** Die Eigenschaft der Verbindung unter einem Einfluss (z.B. Alterung oder Temperatur) bezogen auf dieselbe Eigenschaft direkt nach der Herstellung bei Raumtemperatur (RT); bei unabhängigen Einflüssen können die Abminderungsfaktoren überlagert werden.
  - absolute Steifigkeit:  $A_c = \frac{c_{beeinflusst}}{c_{unbeeinflusst}}$
  - Festigkeit:  $A_B = \frac{F_{B_{beeinflusst}}}{F_{B_{unbeeinflusst}}}$
  - Energieaufnahme:  $A_E = \frac{E_{beeinflusst}}{E_{unbeeinflusst}}$

Die mechanischen Kennwerte wie die Steifigkeit und die Energieabsorption werden über den Kraft-Traversenwegverlauf der Prüfmaschine anhand von Zugscherversuchen einfach überlappender Verbindungen ermittelt. So entstehen über die gesamte Probe keine reinen Zugkennwerte, sondern aus dem komplexen Spannungszustand der Zugscherproben über die Probe verschmierte Werte. Da der komplexe Spannungszustand der Realität näher liegt als idealisierte Zugbelastungen, werden nur diese Werte aufgenommen und betrachtet. Um eine Vergleichbarkeit mit bereits existierenden Ergebnissen zu gewährleisten, muss dieselbe Normgeometrie gewählt werden. Die Abbildung 2.3 (S. 44) skizziert den Verlauf einer Messkurve für einen Zugscherversuch einer einfach überlappenden Verbindung (sowohl für elementare Fügungen wie auch für kombinierte Verbindungen mit einem mechanischen Element).

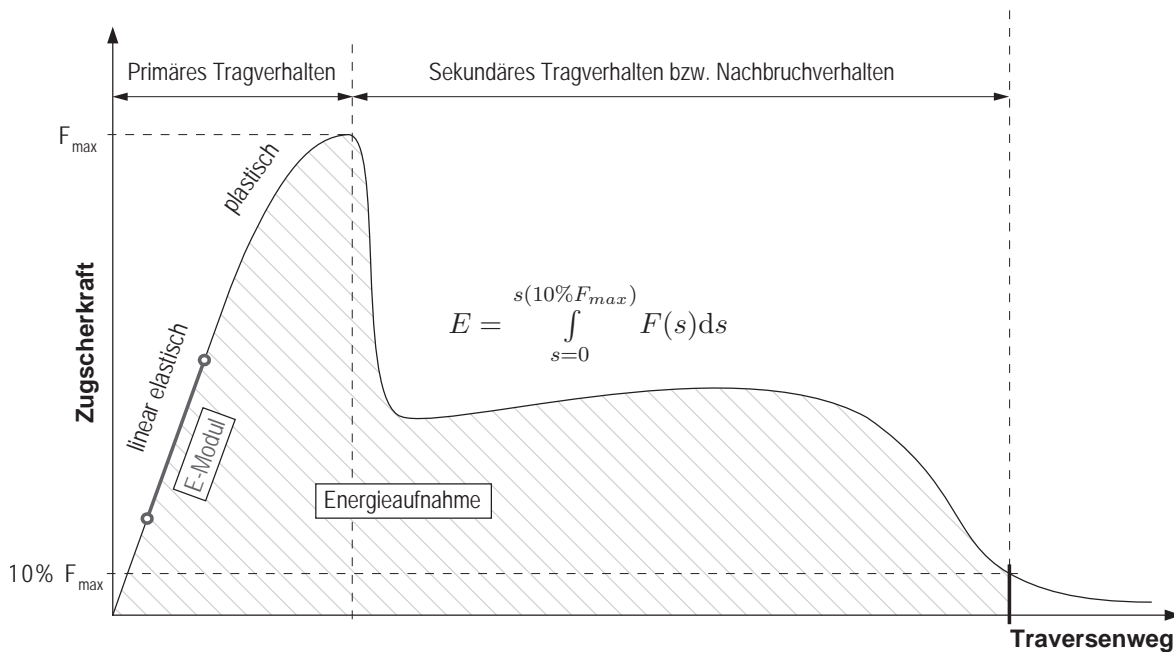


Abb. 2.3: Prinzipskizze des Kraft-Traversenwegverlaufs

Dabei gliedert sich der Kurvenverlauf in drei Abschnitte:

1. Linear elastischer Abschnitt im primären Tragverhalten
2. Plastischer Abschnitt im primären Tragverhalten

3. Nachbruchverhalten / Tragverhalten nach Erstversagen bzw. sekundäres Tragverhalten (z.B. durch ein mechanisches Fügeelement)

Die Steifigkeit wird bei kleinen Dehnungen aus dem linearen Tragverhalten errechnet, während die Energieabsorption durch das Integral unter dem Kraft-Traversenwegverlauf bis zu einem 90%-Abfall der Maximalkraft definiert ist. Durch diese Kennzahlen können die Versuchsergebnisse im Rahmen der Versuchsprogramme dieser Arbeit zusammengefasst, verglichen und bewertet werden.



## 3 Stand der Technik

### 3.1 Verbindungstechnik im Automobilbau für FKV

Neben den Fügeverfahren aus der Metallbauweise sind folgende teils sehr aufwändige Verbindungskonfigurationen sowie deren Kombinationen für Faserverbundbauteile gebräuchlich:

- Klebung / Schweißung
- Bolzen-, Niet- und Schraubverbindungen
- Schlaufenanschluss
- Keilanschluss

Schlaufen- und Keilanschlüsse sind für besonders hoch belastete Verbindungspunkte in Tragwerken oder Rotorblättern einsetzbar. Sie sind sehr aufwändig herzustellen und nur für lokale Anbindungspunkte geeignet. Eine linienförmige Anbindung zweier Bauteile ist nicht möglich.

Punktuelle mechanische Verbindungen wie Bolzen-, Niet- und Schraubverbindungen gelten als nicht faserverbundgerecht. Allein das Einbringen eines Lochs / einer Bohrung bedeutet eine Schwächung eines Faserverbundbauteils von ca. 40 bis 60% bei Zug- und ca. 15% bei Druckbelastungen [GHT02] durch Spannungsüberhöhungen am Lochrand. Zum einen kommt es durch die Kerbwirkung einer Bohrung zu Normalspan-

nungsüberhöhungen am Lochrand (Abb. 3.1a, S. 47). Zum anderen entstehen durch die lokale Krafteinleitung große Druckspannungen an der Kontaktfläche des mechanischen Elements, was zu Delaminationen oder einem Brechen bzw. lokalen Ausknicken der Verstärkungsfasern führen kann. Ein Presssitz des Verbindungselements, welcher häufig bei metallischen Fügungen vorteilhaft ist, kann bei Faserverbundbauteilen jedoch zu Delaminationen am Lochrand führen und so das Bauteil schon beim Fügen beschädigen. Um eine gute Tragfähigkeit der Verbindung zu erreichen, müssen möglichst passgenaue Verbindungselemente verwendet werden.

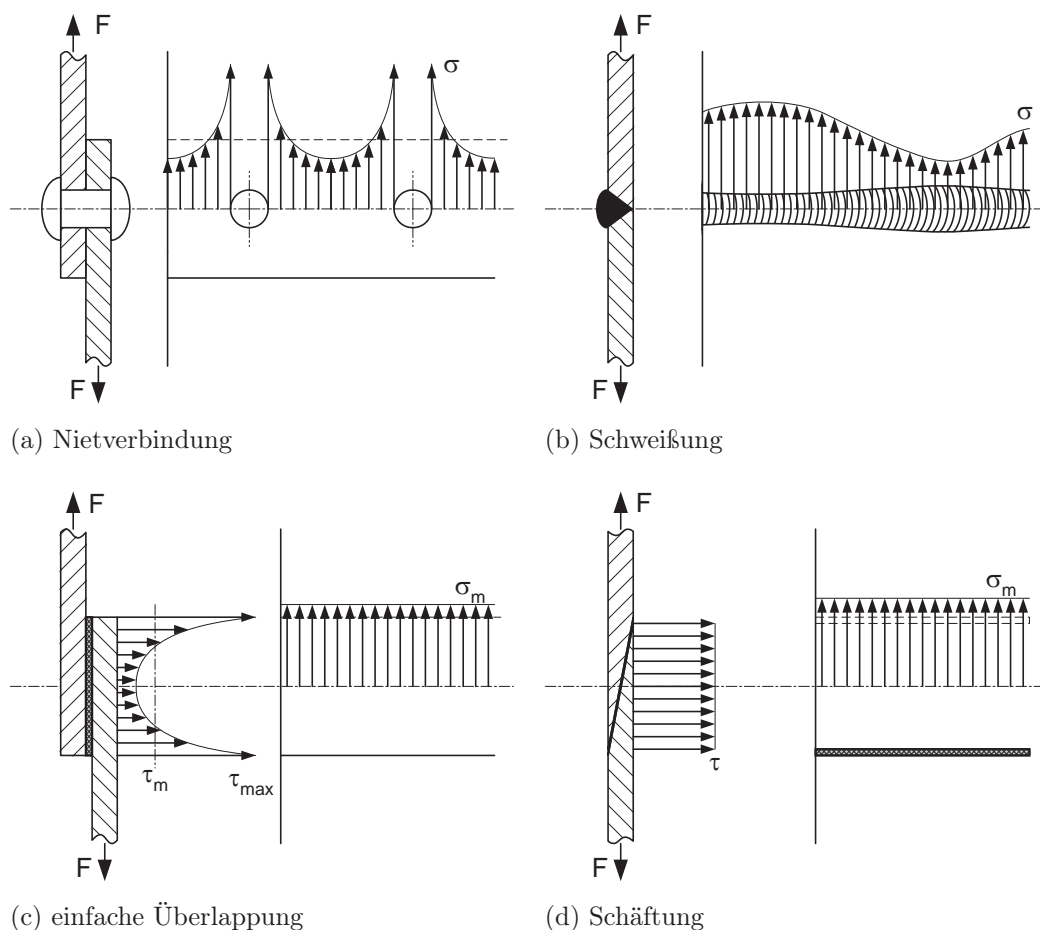


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Spannungsverteilung bei punktueller und linienförmiger Anbindung am Beispiel einer Nietverbindung, einer Schweißverbindung und Klebungen mit unterschiedlichen Verbindungsgeometrien

Da Faserverbundwerkstoffe im Allgemeinen kein ausgeprägtes Fließverhalten aufweisen, können Spannungsspitzen nicht durch lokales Plastifizieren abgebaut werden und es kommt zur Materialschädigung. Um dem entgegenzuwirken, müssen die Bohrungen und die Fügebereiche lokal verstärkt werden. Alternativ kann das gesamte Bauteil stärker (über-)dimensioniert werden, was jedoch zu Lasten des Leichtbaus geht.

Für punktförmige Anbindungen wird ein Versagen auf Lochleibung angestrebt, da diese Versagensart bei FKV-Verbindungen als einzige ein gutmütiges und kein schlagartiges Versagensverhalten zeigt. Durch Zwischenfaserbrüche und Delaminationen wird die Steifigkeit am Lochrand lokal reduziert, so dass das Versagen dem eines elastisch-plastischen Werkstoffs ähnelt [Sch07]. Um ein Lochleibungsversagen hervorzurufen, wurden allgemeine Designregeln wie minimale Randabstände oder geeignete Laminataufbauten (Abb. 3.2, S. 49) aufgestellt [Ehr04, Arb03, US 02, GHT02, Sch07]. Für die meisten Anwendungen ist der Aufwand zu groß, den Laminataufbau im Krafteinleitungsbereich lokal zu ändern oder zu verstärken. Die Festigkeiten einer Verbindung sind stark vom Passungsverhältnis zwischen Bolzen und Bohrung abhängig [KH04].

Stoffschlüssige Verbindungen wie Klebungen (Abb. 3.1c, S. 47) und Schweißungen (Abb. 3.1b, S. 47) dagegen sind fasergerecht, weil die Kraft linienförmig bzw. großflächig in die Fasern bzw. die Matrix eingeleitet werden kann. Schweißverbindungen sind nur bei Faserverbundwerkstoffen mit thermoplastischer Matrix möglich.

Es existieren bei linienförmiger Anbindung keine lokalen Normalspannungsüberhöhungen wie bei der Bolzenverbindung (vgl. Abb. 3.1a und Abb. 3.1b bzw. 3.1c, S. 47). Jedoch ist der Aufwand zur Herstellung einer Klebverbindung relativ hoch, da für eine qualitativ hochwertige Klebverbindung die Klebflächen meist vorbehandelt und die Fügepartner bis zur Aushärtung des Klebstoffs zueinander fixiert werden müssen. Zudem ist eine Qualitätssicherung von Klebverbindungen vor allem in der Serienfertigung schwierig, da zerstörungsfreie Prüfverfahren wie z.B. Ultraschall in der Anwendung sehr aufwändig sind. Klebungen weisen geringe Festigkeiten bei Querkzug- und Schäl-

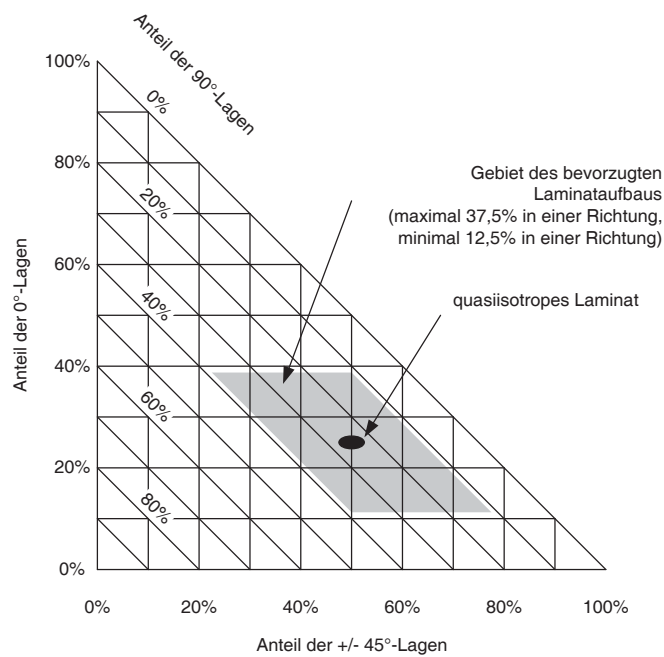


Abb. 3.2: Bevorzugter Lagenaufbau für punktförmige Krafteinleitung [Ehr04]

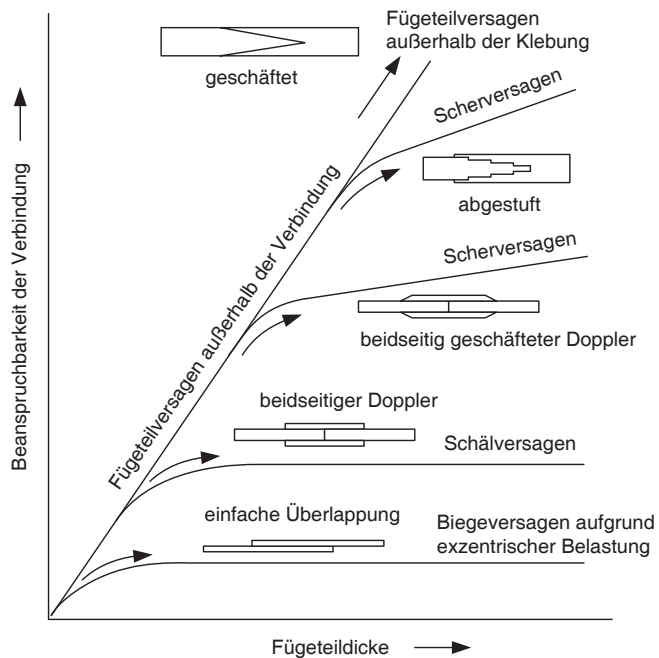


Abb. 3.3: Belastbarkeit verschiedener Verbindungsgeometrien [HS74]

belastungen auf. Einer Schubspannungsüberhöhung an den Überlappungsenden kann mit einer geänderten Verbindungsgeometrie wie beispielsweise mit Schäftung der Fügepartner entgegengewirkt werden (vgl. Abb. 3.1c und Abb. 3.1d, S. 47) und so in Abhängigkeit von der Verbindungsgeometrie eine höhere Festigkeit erreicht werden (Abb. 3.3, S. 49). Auch hier müssen wieder Aufwand und Nutzen abgewogen werden.

Es ist zu beachten, dass alle Designregeln aufgrund der vielen verschiedenen Einflussfaktoren bei FKV nur als Anhaltspunkte dienen können. Sie sind nie allgemeingültig. Die größte Herausforderung für die Verbindungstechnik in der Automobilindustrie bildet die kostengünstige Produktion hoher Stückzahlen. Deshalb müssen automatisierte Verbindungstechniken zur Anwendung kommen.

Um den Produktionsprozess so robust wie möglich zu halten, werden toleranzunempfindliche Verbindungstechniken bevorzugt. Im Gegensatz zu einer Blindnietverbindung (BN) müssen für Halbhohlstanznietverbindungen (HSN) keine Vorlöcher gebohrt und zueinander positioniert werden. Bei diesem Verfahren dient der Halbhohlstanzniet selbst als Schneidstempel für die Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung zweier Bleche. Beim Setzvorgang wird der Niet durch eine Matrize nach außen plastisch so verformt, dass es zu einem Hinterschnitt und somit einer Schließkopfbildung kommt. Der Stanzbutzen füllt dabei den hohlen Nietschaft und wird von diesem eingeschlossen.

Aktuell werden im metallischen Karosseriebau die Profilanschlüsse zum Großteil mit unterschiedlichen Schweißverfahren gefügt. Blechbauteile werden ebenfalls geschweißt oder mit Hilfe von mechanischen Fügeverfahren wie dem Halbhohlstanznieten verbunden. Mechanische Verbindungen werden häufig zusätzlich mit unterschiedlichen, vollautomatisiert aufgetragenen Klebstoffen verklebt, was zum einen der Abdichtung der Verbindungsnahte und zum anderen der Erhöhung der Steifigkeit und der Energieaufnahme im Crashfall dient. So werden im modernen Karosseriebau Automatisierungsgrade von über 95% erreicht [BMW08].

Folgende Verbindungstechniken werden in unterschiedlichen Varianten und Kombinationen im metallischen Automobilbau vor allem wegen ihres hohen Automatisierungspotentials eingesetzt:

- Kleben
- Schweißen
- Schrauben
- Einpressen
- Stanznieten / Halbhohlstanznieten
- Durchsetzfügungen
- fließlochformendes Schrauben (FDS)

Zusätzlich kommen noch Blindniete und Blindnietmuttern bzw. -schrauben als schlecht automatisierbare Verfahren zum Einsatz.

Weiter lassen sich die im Automobilbau auftretenden Verbindungen durch ihre Beschaffenheit in drei Hauptgruppen von einteilen:

#### 1. **Befestigungspunkte**

Krafteinleitungspunkte, an denen lokal hohe Kräfte übertragen werden müssen. Als Beispiel kann hier die Fahrwerksanbindung an die Karosserie oder die Motoraufhängung genannt werden. Die Verbindung von zwei Baugruppen an einem Befestigungspunkt erfolgt überwiegend in der Montage, so dass die Verbindung in der Regel von Hand geschaffen wird und z.B. zu Reparaturzwecken lösbar sein muss. Befestigungspunkte müssen individuell auf ihren speziellen Fall ausgelegt werden; somit ist es schwierig, allgemein gültige Aussagen über Gestalt und Konstruktion zu treffen.

## 2. Montagebefestigungen

Strukturell nicht tragende Befestigungspunkte bzw. Funktionselemente. Sie sind die am häufigsten im Fahrzeug vorkommende Verbindungsart. Auch hier gibt es eine weite Spanne des Belastungsbereichs, beginnend beim einfachen Klips für eine Kabelbefestigung bis zur Befestigung von großen Verkleidungsteilen. Daher gibt es eine sehr große Vielfalt unterschiedlichster Verbindungselemente. Eine weitere Unterteilung der Montagebefestigungen in Funktionsgruppen ist erforderlich, um Gestalt und Konstruktionsregeln festlegen zu können.

## 3. Strukturelle Verbindungen

Verbindungen, die die Fahrzeugstruktur zusammenhalten. Primär handelt es sich um Verbindungspunkte zur Fertigung der Karosserie, die mittlere bis hohe Lasten übertragen. Die Anforderung an die Verbindungsqualität ist hoch, da strukturelle Verbindungen meist sicherheitskritisch sind. Die Verbindungen liegen häufig nicht im Sichtbereich und sind durch die Außenhaut verdeckt. Die Fügung struktureller Verbindungen wird fast ausschließlich vollautomatisiert im Karosseriebau durchgeführt. Diese Gruppe der strukturellen Verbindungen im Automobilbau bildet den Schwerpunkt dieser Arbeit.

## 3.2 Verbindungsszenarien struktureller Verbindungen

Um Fügeverfahren auf ihre Eignung abschätzen zu können, müssen im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit möglichst alle für die Verbindungsherstellung wichtigen Randbedingungen bekannt sein. Dies bezieht sich auch auf nachgelagerte Fertigungsprozesse, die die Fügung unbeschadet überstehen muss. Diese Lasten können stark von den Lebenszykluslasten abweichen. Viele Randbedingungen der Fertigung können direkt von den zu fügenden Bauteilen abgeleitet werden.

Für einen Einsatz von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen im Mischbau wird in dieser Arbeit von einer mit den bestehenden Verfahren gefertigten Aluminiumkarosserie

ausgegangen. So ist der Einfluss durch ein Faserverbundbauteil auf die Fertigungskette und die Fertigungsverfahren gering. Da sich somit Faserverbundbauteile in die Fertigung des metallischen Karosseriebaus einfügen müssen, ist es notwendig, die potentiellen Bauteile für den Faserverbundeinsatz und die damit verbundenen fügetechnischen Randbedingungen aus dem Aluminiumbau zu identifizieren.

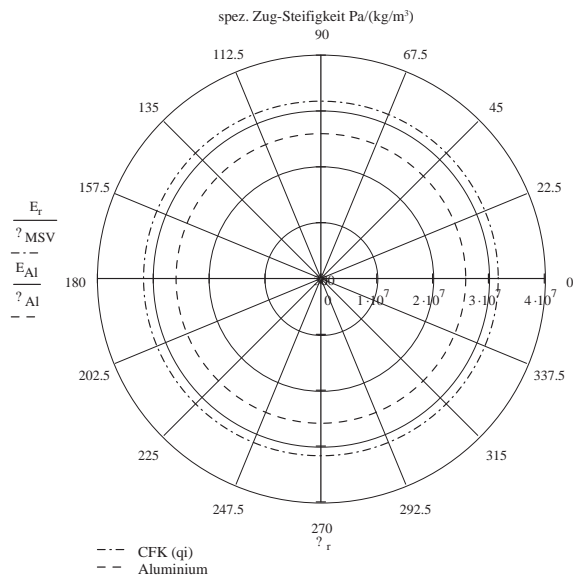
### 3.2.1 Identifikation geeigneter Bauteile für einen CFK-Einsatz

Prinzipiell sind alle Karosseriebauteile für sich betrachtet für den Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen geeignet. Die spezifischen Steifigkeiten eines ebenen, quasiisotrop (qi.) aufgebauten CFK-Bauteils liegen in allen Belastungsrichtungen über denen einer Aluminiumplatte (Abb. 3.4, S. 54). Selbst ohne belastungsgerechte Auslegung der Faserverbundbauteile sind diese bei gleichem Gewicht steifer bzw. bei derselben Steifigkeit leichter als ein Referenzbauteil aus Aluminium. Durch die höhere spezifische Steifigkeit der Kohlenstofffaser wird bei einem quasiisotropen Aufbau ohne fasergerechte Auslegung der Bauteile eine Gewichtsreduktion von ca. 20 bis 25% erreicht.

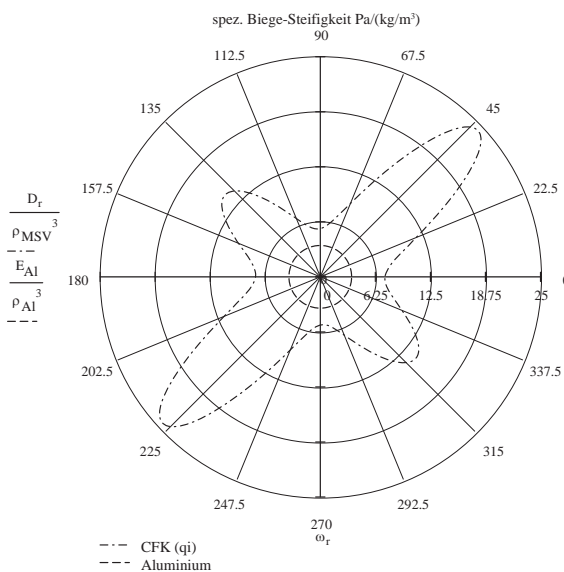
Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe eignen sich folgerichtig für flächige Bauteile, die als Schubfeld in einer steifen Gesamtstruktur eingesetzt werden. Beispielhaft ist hier eine in einen Aluminium Space Frame (ASF) eingebundene Bodenstruktur zu nennen. Wird die Faserorientierung auf die vorherrschenden Lastfälle hin angepasst und optimiert, besteht durch den anisotropen Aufbau ein wesentlich höheres Potential, die Steifigkeit zu erhöhen bzw. das Gewicht zu reduzieren.

Durst entwickelte ein Verfahren, das es durch die Betrachtung der in Simulationen mit der Finiten Elemente Methode (FEM) ermittelten Karosserieeigensteifigkeiten ermöglicht, die Anisotropie einzelner Lastfälle zu erfassen und zu bewerten [Dur07]. So können besonders anisotrop belastete und damit für den Faserverbundeinsatz geeignete Bauteile identifiziert werden. Aus der Charakteristik der Lastfälle werden erste Abschätzungen bezüglich der benötigten Faserorientierung gemacht.

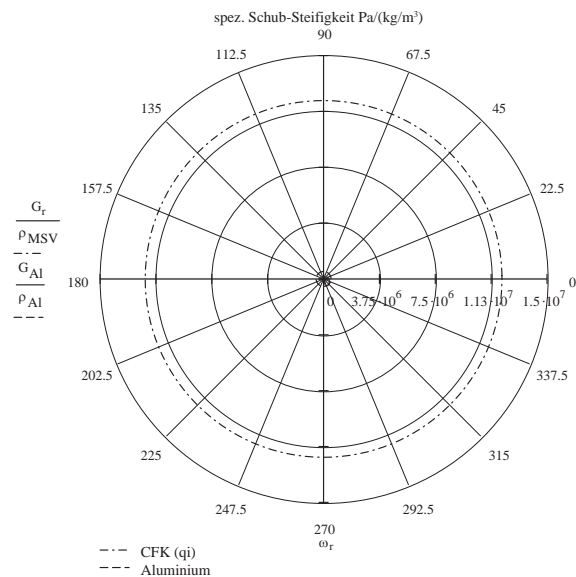




(a) Spezifische Zug-Steifigkeit



(b) Spezifische Biege-Steifigkeit



(c) Spezifische Schub-Steifigkeit

Abb. 3.4: Polardarstellung der mit der klassischen Laminattheorie (KLT) berechneten spezifischen Zug-, Biege- und Schubsteifigkeiten  $\left[\frac{Pa}{kg/m^3}\right]$  eines ebenen quasiisotrop (qi.) aufgebauten CFK-Bauteils  $[+45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_S$  (rot) gegenüber einer Aluminiumplatte (blau) in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung

Das Verfahren geht von den FEM Berechnungen einer Karosserie in Metallbauweise mit direkter Bauteilsubstitution aus und erzielt Ergebnisse für eine grobe Vorauslegung, vor allem da kein zweiter Durchlauf des Verfahrens mit veränderten Bauteilsteifigkeiten und Gewichten vorgesehen ist. Eventuell auftretende Problematiken des Mischbaus, z.B. durch unterschiedliche Wärmedehnungen und die Verbindungstechnik, werden nicht berücksichtigt.

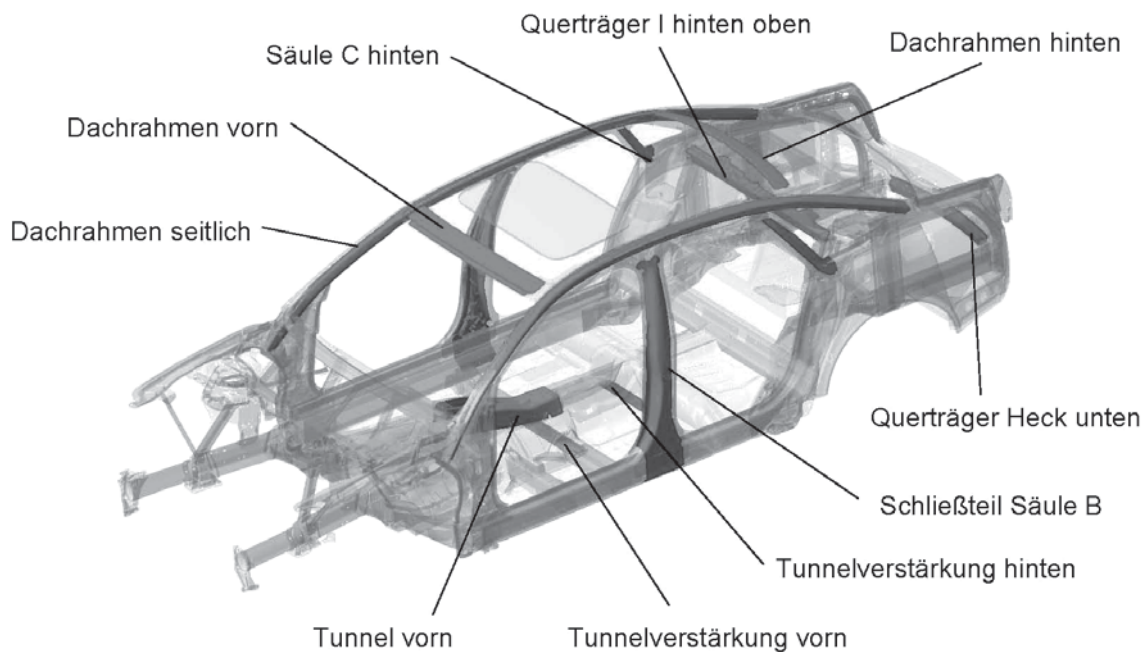


Abb. 3.5: Geeignete Bauteile für den Faserverbundeinsatz des Audi A8, identifiziert mit dem Verfahren nach Durst [Dur07]

Abbildung 3.5 (S. 55) zeigt die mit diesem Verfahren identifizierten und für den Faserverbundeinsatz besonders geeigneten Bauteile der Aluminium Karosserie des Audi A8. Es ist ersichtlich, dass sich zusätzlich zu flächigen Bauteilen besonders lange, stab- bzw. balkenähnliche Elemente für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen eignen, weil lange Stab- bzw. Balkenelemente vorwiegend auf Druck / Zug bzw. Biegung belastet werden. Durch diese überwiegend einachsigen Spannungszustände bieten die Bauteile bei optimiertem Faserverlauf ein besonders hohes Leichtbaupotential.

Da Bauteile aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen im Allgemeinen aufwändiger und teurer als vergleichbare Bauteile aus Aluminium sind, müssen die FKV-Bauteile gezielt und werkstoffgerecht eingesetzt werden.

Inwieweit sich Bauteile wirklich für den Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen eignen hängt von vielen anderen Faktoren wie der Fertigung, der Krafteinleitung, den Betriebslasten, der Alterung u.v.m. ab. Es muss im Einzelfall entschieden werden, welche Auswirkungen eine Materialsubstitution auf das Fahrzeugleben von der Herstellung bis zum Recycling hat und inwieweit sich der Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen rentiert.

Ein Leichtbau an der richtigen Stelle kann zu primären und sekundären Effekten führen, die den Leichtbau rentabel machen (Kap. 1.2, S. 23). Andererseits gibt es vor allem bei kleineren Serien wie bei der Heckklappe des Lamborghini Gallardo Spyder die Möglichkeit, durch eine funktionsintegrierte Auslegung der Bauteile die Anzahl der Teile zu reduzieren (Kap. 1.3.1, S. 28). Aufgrund der geringeren Investitions- und Montagekosten im Vergleich zur Variante aus Metall entstehen so Kostenvorteile.

### 3.2.2 Geometrie der Fügebereiche struktureller Verbindungen

Die Geometrie der Fügebereiche struktureller Verbindungen ist so einfach, wie es die automatisierte Fertigung erfordert. Nahezu jede Geometrie lässt sich auf eine einfach überlappende Verbindung reduzieren. Profilan schlüsse können bei der Anbindung an Knotenelemente als eine umlaufend einschnittige, einfach überlappende Verbindung betrachtet werden. Durch die Rotationsgeometrie bzw. rotationsähnliche Geometrie entsteht eine zusätzliche Stützwirkungen, die die Festigkeit und die Steifigkeit erhöht.

Die im Automobilbau sogenannten zweiseitigen Verbindungen sind im eigentlichen Sinne eine Reihenschaltung von zwei einfach überlappenden einschnittigen Verbindungen (Abb. 3.6, S. 57).

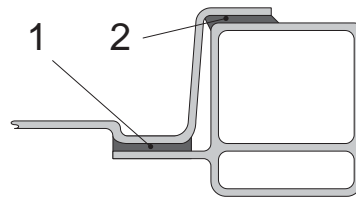


Abb. 3.6: Schematische Darstellung einer im Automobilbau üblichen zweischnittigen Anbindung eines Blechbauteils an ein Profil

Durch die doppelte Ausführung der Verbindung wird eine erhöhte Sicherheit erreicht. Mit einer solchen Konfiguration können auftretende Lasten bei geometrisch unterschiedlichen Lagen der in Reihe geschalteten Verbindungsstellen gegenseitig vermindert werden.

Ist das Festigkeits- und Steifigkeitsverhalten einer einschnittigen, einfach überlappenden Verbindung bekannt bzw. abschätzbar, ist dies ein brauchbarer Richtwert für die Vorauslegung. Der komplexe mehrachsige Spannungszustand einschnittiger, einfach überlappenden Verbindungen wird schnell und einfach mit Zugscherproben abgebildet.

An genormten Probengeometrien wird eine übertragbare Wissensbasis als Grundlage für eine vergleichbare Bewertung der Verbindungstechniken geschaffen. Diese Ergebnisse werden anschließend mit einer Systematik wie der Fugestellenanalyse aufbereitet und strukturiert.

### 3.2.3 Randbedingungen aus Fertigung und Betrieb

Die automatisierte automobiler Fertigung gliedert sich bei nahezu allen Herstellern in diese drei Phasen:

1. Bauteilfertigung
2. Karosseriebau
3. Montage

Nach der Bauteilfertigung wird die tragende Struktur des Fahrzeugs im Karosseriebau zusammengesetzt. Anschließend läuft die so entstandene Karosserie durch die Lackiererei. Danach wird das Fahrzeug in der Montage fertig gestellt.

Prinzipiell können CFK-Bauteile entweder im Karosseriebau oder in der Montage in ein Fahrzeug integriert werden. Während die Betriebslasten für ein Bauteil unabhängig vom Integrationszeitpunkt sind, bestehen große Unterschiede in der Fertigung in Abhängigkeit vom Fügezeitpunkt. So haben in der Montage gefügte Bauteile nicht die Temperaturbelastungen durch die Lacktrockner von bis zu  $+200^{\circ}\text{C}$ , sondern nur die allgemeinen Betriebslasten von bis zu  $+80^{\circ}\text{C}$  zu ertragen, müssen aber unter Umständen wegen fehlender Lackierung zusätzlich vor Korrosion geschützt werden.

Aus dem Fügezeitpunkt im Fertigungsprozess ergeben sich unterschiedliche Randbedingungen für die Fügung. Randbedingungen, die durch Betriebslasten auftreten, sind für beide Varianten, d.h. bei Fügung im Karosseriebau und Fügung in der Montage, gleichermaßen zu berücksichtigen.

Art und Lage der Bauteile, die für den strukturellen Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Verbundkomponenten geeignet sind (vgl. Kap. 3.2.1, S. 53), erfordern eine Integration in die Fahrzeugstruktur im Karosseriebau, obwohl eine Lackierung der FKV-Bauteile nicht oder nur bedingt notwendig ist. Ein Dach aus Aluminium beispielsweise kann nicht eingesetzt werden, ohne vorher einen Dachrahmen aus CFK in der Karosserie zu montieren. Eine Integration strukturell tragender Bauteile nach der Lackierung unter lackierten Sichtbauteilen gestaltet sich ebenfalls als schwierig. Werden beispielsweise später zu entfernende Fertigungshilfsmittel zur Fixierung der zu lackierenden Teile für den Durchlauf durch die Lackiererei verwendet, ist ein Einbringen der nicht lackierten Bauteile nur mit großem Aufwand denkbar. Zuerst müssen die lackierten Bauteile und die Fertigungshilfsmittel demontiert werden, bevor eine Montage der nicht lackierten Bauteile und die erneute Montage der lackierten Bauteile möglich ist. Ein Einbringen dieser Teile nach der Lackierung in der Montage bedeutet also einen Mehraufwand, der in keinem Verhältnis zum Nutzen steht.

Ein weiterer Nachteil des Fügens strukturell tragender Bauteile in der Montage ist, dass zweikomponentige Montageklebstoffe geringere Festigkeiten und Energieaufnahmen besitzen als die im Karosseriebau zu Anwendung kommenden heiß härtenden einkomponentigen Systeme.

Folglich ist in der Fertigungskette nur im Karosseriebau eine sinnvolle Möglichkeit zur Fügung strukturell tragender Bauteile gegeben.

Da auch in naher Zukunft die Karosserien in Mischbauweise hauptsächlich aus metallischen Strukturen bestehen werden, müssen sich alle zu montierenden Bauteile in die vorhandenen Fertigungsprozesse für metallische Karosserien einfügen und mit diesen verträglich sein. Das gilt auch für die Faserverbundkomponenten und die Fügeverfahren dieser speziellen Mischverbindung. So werden die Randbedingungen durch die bestehende Fertigung für metallische Karosserien vorgegeben.

### 3.2.3.1 Randbedingungen in der automobilen Fertigung

Mechanische Belastungen können in der Fertigung sowohl im Karosseriebau als auch in der Montage nahezu vernachlässigt werden. Die Bauteile und Verbindungen müssen selbsttragend und handhabungsfest sein. Diese Lasten liegen im Allgemeinen weit unter den im Fahrzeugbetrieb auftretenden Lasten.

Im Karosseriebau sind für Faserverbundbauteile in erster Linie die thermischen Lasten dimensionierend. Neben den thermischen Fügeverfahren, die die Karosserie nur lokal erhitzen, entstehen die Temperaturbelastungen hauptsächlich durch die Wärmeöfen in der Lackiererei. Die Temperaturen der Öfen, die während der einzelnen Fertigungsschritte durchlaufen werden, sind in Abbildung 3.7 (S. 60) zusammengefasst.

Sie zeigt, dass während der Fertigung die Materialien Temperaturen bis zu  $+200^{\circ}\text{C}$  ausgesetzt werden. Diese Temperaturen werden zum einen benötigt, um den aufgetragenen

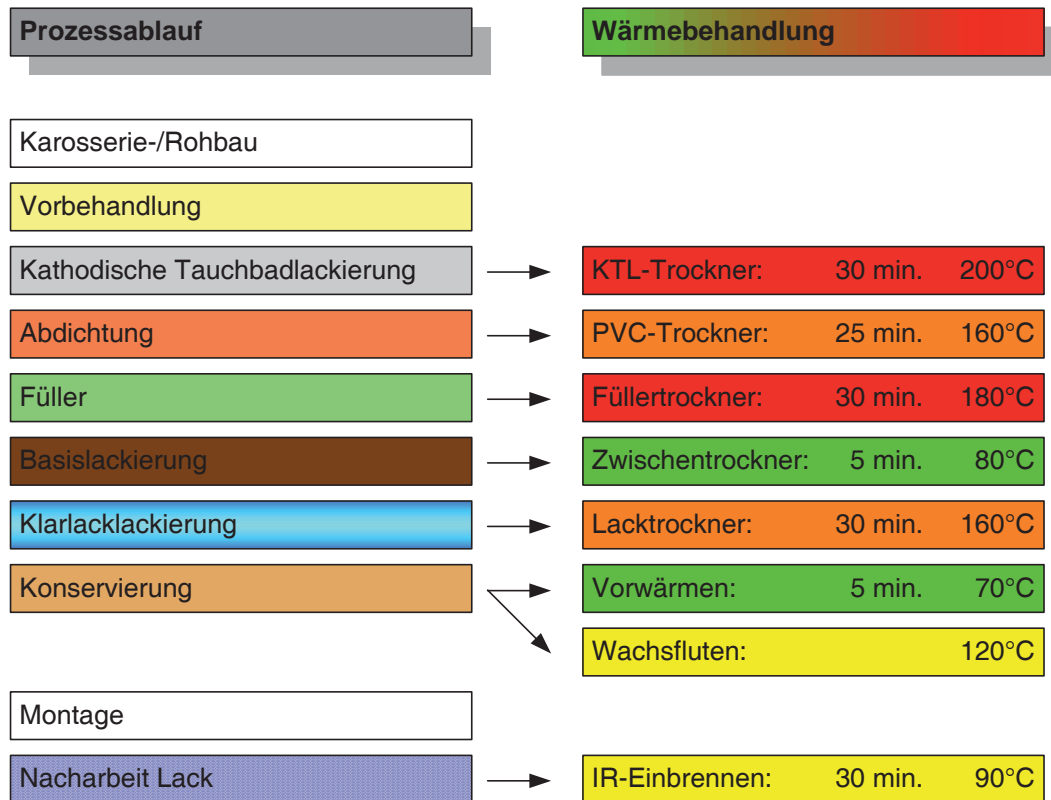


Abb. 3.7: Temperaturlasten bei der Fertigung einer Aluminiumkarosserie

Lack einzubrennen, zum anderen, um gleichzeitig die verwendeten Aluminiumlegierungen auszulagern und so durch die Wärmebehandlung in den Aushärtungszustand T6 (lösungsgeglüht, abgeschreckt und warm ausgelagert auf höchste Festigkeit) [DIN93] zu überführen. Ferner wird diese Wärme genutzt, um hochfeste und strukturell tragende Karosseriebauklebstoffe auszuhärten.

Hier kommen einkomponentige (1k), auswaschbeständige und mit dem Prozess der kathodischen Tauchbadlackierung (KTL) kompatible Klebstoffe zum Einsatz. Diese Klebstoffe sind für eine gute Haftung auf öligen bzw. mit Trockenschmierstoff behandelten Blechen konzipiert. Sie verkraften nach heutigem Stand eine Ölaufgabe von bis zu  $3 \frac{g}{m^2}$  bzw. eine Trockenschmierstoffaufgabe von bis zu  $1,5 \frac{g}{m^2}$  ohne einen wesentlichen Abfall der mechanischen Kennwerte. Dadurch entfällt im Karosseriebau eine aufwändige Vorbehandlung der Bleche.

Die in der Montage auftretenden thermischen Belastungen sind als relativ gering und vernachlässigbar einzustufen, weil sie unter bzw. sehr nahe an den Betriebslasten liegen. Es kommen zweikomponentige (2k), bei Raumtemperatur vernetzende Klebstoffe zur Anwendung. Da auf die lackierte Karosserie geklebt wird, ist die Tragfähigkeit einer Klebverbindung zusätzlich durch die Lackfestigkeiten begrenzt. Übliche KT-Lackierungen ertragen Spannungen von ca.  $15\text{MPa}$ . Da diese Klebstoffe nicht wie Karosseriebaulebmittel eingebrannt werden, ist die adhäsive Anbindung an die Oberfläche des FKV-Bauteils bei den Versuchen aufmerksam zu betrachten.

Aufgrund der hohen thermischen Belastung in den Öfen der Lackiererei und der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner wird für das Grundlagenversuchsprogramm dieser Arbeit eine Doppelstrategie gewählt. Es wird die Verbindungstechnik in der Montage und im Karosseriebau untersucht. Eine Montagelösung ist für einen Supersportwagen wie den Audi R8 durchaus denkbar. Bei größeren Stückzahlen ist jedoch die Integration der FKV-Bauteile aus Gründen des Fertigungsablaufs nur im Karosseriebau sinnvoll.

### 3.2.3.2 Randbedingungen durch den Betrieb

Im Gegensatz zu den in der Fertigung auftretenden Lasten sind die Lasten im Betrieb eines Fahrzeugs wesentlich weiter gestreut und schwer zu erfassen. Es kann also kein allgemein gültiges Belastungsprofil erstellt werden. Kritisch sind vor allem die Belastungen durch Alterung und Missbrauch zu sehen.

Allgemein können die sich aus den Betriebslasten ergebenden Anforderungen für ein Fahrzeug wie folgt zusammengefasst werden:

- Betriebslasten - stark bauteilabhängig, nicht verallgemeinerbar
- Korrosions- / Witterungsbeständigkeit - abhängig von der Bauteillage
- Alterungsbeständigkeit



- Temperaturbeständigkeit - abhängig von der Bauteillage, z.B. [Sch07]

Schalttafel:	$-40^{\circ}C$	bis	$+120^{\circ}C$
Hutablage:	$-40^{\circ}C$	bis	$+100^{\circ}C$
Außenhaut:	$-40^{\circ}C$	bis	$+80^{\circ}C$
Nähe Abgasanlage (abgeschirmt):	$-40^{\circ}C$	bis	$+130^{\circ}C$
- Verformungsbeständigkeit

Eine genauere Spezifikation ist nur im konkreten Einzelfall möglich, weil sie von Fahrzeug zu Fahrzeug variierenden Einflussfaktoren abhängt. Beeinflusst werden die Anforderungen an die Bauteile und die Verbindungen beispielsweise durch das Fahrzeugkonzept, die Lage der Bauteile im Fahrzeug und die Aufgabe der Bauteile. So ist selbst eine vom Bauteil abhängige Bewertung nicht zielführend. Sinnvoll ist hier die allgemeine Beurteilung der Verbindungstechnik (vgl. Kap. 2.3, S. 42). Bei der Fahrzeugkonstruktion muss der Ingenieur sein Problem im Einzelfall betrachten und aus der bereitgestellten Datenbank den nächstliegenden Fall zur Bewertung heranziehen.

## 4 Fazit und Aufgabenstellung

Um ausgewählte Verbindungstechniken prüfen und bewerten zu können, muss zunächst die Fügbarkeit (Kap. 2.1, S. 35) für die verwendeten Materialien nachgewiesen werden. Besonderes Augenmerk ist hier auf die Randbedingungen der automobilen Fertigung zu richten, da hier die wesentlichen Unterschiede und Einschränkungen zu den aus der Luftfahrt bekannten Untersuchungen liegen.

Für die weiteren Festigkeitsuntersuchungen bieten sich normierte Zugscherversuche an, wie sie bereits in der Fügstellenanalyse verwendet werden. Zugscherversuche sind zum einen einfach herzustellen und zu prüfen, zum anderen sind sie auch für die automobilen Verbindungstechnik repräsentativ. Im Metallbau verwendete Fügeverfahren werden ebenfalls mit Hilfe von Zugscherversuchen geprüft. So ist die Vergleichbarkeit gegeben und die bereits existierenden Versuchsergebnisse werden sinnvoll genutzt und ergänzt.

Für den Mischbau mit Kohlenstofffaserverbundstrukturen im Automobilbau ist es notwendig, die Einflussfaktoren in der Verbindungstechnik abzuschätzen und zu bewerten. Da nur geringe Erfahrungen mit FKV-Strukturen in einer automatisierten Serienfertigung vorhanden sind, muss eine Wissensbasis geschaffen werden, die es ermöglicht, Verständnis für die auftretenden Effekte im Unterschied zum Metallbau aufzubauen. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen, besonders in Relation zu vergleichbaren Aluminium-Aluminium-Verbindungen (Al-Al), muss eine Optimierung der Fügeverfahren stattfinden, um das Potential der Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe voll ausnutzen zu können.

Des Weiteren wird ein Hilfsmittel benötigt, das es dem aus dem Metallbau kommenden Konstrukteur ermöglicht, die gewonnenen Erkenntnisse ohne großen Aufwand zu nutzen. Die Herangehensweise von Wittke und Füssel und die daraus abgeleitete Fügestellenanalyse bietet einen ersten pragmatischen Ansatz (vgl. Kap. 2.2, S. 36). Dieses Verfahren setzt eine relativ große Datenmenge voraus. Es liegen bisher im Vergleich zum Metallbau nur geringe Erfahrungen und damit Ergebnisse für einen Mischbau mit strukturellen FKV-Bauteilen vor allem mit Fügung im Karosseriebau vor. So muss ergänzend ein Verfahren geschaffen werden, das bereits mit relativ geringen Datenmengen in der Lage ist, den Konstrukteur zu unterstützen. Es ist sinnvoll, dieses Verfahren so offen zu gestalten, dass neue Erkenntnisse und Versuche schnell integriert werden können und so ein Erweitern der Datenbank möglich ist. Eine Kompatibilität dieses Verfahrens mit dem bestehenden Verfahren der Fügestellenanalyse ist in jedem Falle anzustreben.

Zur Veranschaulichung der Erkenntnisse ist ein Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit den bekannten Verbindungstechniken aus der Metallbauweise äußerst sinnvoll, um so auf den Erfahrungen des Konstrukteurs aufzubauen. Dies entspricht der üblichen Vorgehensweise bei Neukonstruktionen, bei denen auf die Erfahrung aus vorangegangenen Modellen zurückgegriffen wird.

Dieser Vergleich ist im Besonderen notwendig, weil sich viele Designregeln nicht aus den mechanischen Lasten direkt ableiten lassen. Zudem ist es oft schwierig bis unmöglich, die auftretenden Lasten genau zu bestimmen. Die Effektivität und damit die Nutzbarkeit einer Verbindungstechnik für den Mischbau muss anhand einfacher Geometrien abgeschätzt, denen der klassischen Verbindungen aus dem Metallbau gegenübergestellt und abschließend bewertet werden.

Aus diesen Aufgaben leiten sich konkret folgende Arbeitspakete ab:

1. Untersuchung auf Fügbarkeit

- Werkstoff: Wahl und Eignungsnachweis der gewählten Werkstoffe

- 
- Fertigung: Identifikation und Anwendung der Randbedingungen
  - Konstruktion: Gestaltung der Fügung und Definition der Beanspruchung
2. Identifikation geeigneter Verbindungstechniken
    - Analyse der vorhandenen Verbindungstechniken
    - Durchführung eines Versuchsprogramms mit unterschiedlichen Fügeverfahren zur Übersichtsgewinnung
    - Auswahl besonders geeigneter Verbindungstechniken
  3. Grundlagenversuchsprogramm
    - Aufzeigen von Einflussfaktoren
    - Durchführung eines detaillierten Versuchsprogramms mit besonders geeigneten Verbindungstechniken zur Abschätzung der Einflussfaktoren
    - Vergleich mit einer Al-Al-Verbindungen
    - Bewertung der getesteten Verbindungen
  4. Optimierung
    - Identifikation geeigneter Maßnahmen zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften
    - Erweiterung des Grundlagenversuchsprogramms auf optimierte Proben
  5. Aufbau eines FE-Simulationsmodells
    - Abbildung der im Versuch auftretenden Effekte
    - Schaffung der Grundlagen zur Optimierung der Verbindungseigenschaften mit Hilfe der Finiten Element Methode (FEM)



## 6. Aufbereitung der Ergebnisse für den Konstrukteur

- Vereinfachte Darstellung der Ergebnisse für ein intuitives Verständnis
- Entwicklung eines wissensbasierten Werkzeugs als intuitives Hilfsmittel

Bei allen durchzuführenden Arbeitsschritten ist es besonders wichtig die automobilen Randbedingungen im Auge zu behalten, um so die Relevanz und damit den Nutzen der Ergebnisse für den Automobilbau sicher zu stellen.

## 5 Grundlagenversuche

Ziel der Grundlagenversuche ist es zunächst, eine geeignete Werkstoffkombination für die Untersuchung einer CFK-Aluminium-Mischverbindungen (CFK-Al) im Karosseriebau zu identifizieren (Kap. 5.1, S. 68). Dabei wird nach einem für den Karosseriebau repräsentativen Al-Werkstoff und einem im Karosseriebau einsetzbaren FKV-Werkstoff gesucht. Diese Werkstoffe werden in allen Bereichen der Fügbarkeit für eine Fügung im Karosseriebau überprüft. Vor allem die hohen Temperaturen in den Trocknungsöfen des Karosseriebaus stellen hohe Anforderungen an den FKV.

Anhand dieser Materialpaarung werden die wesentlichen Einflüsse auf die Verbindungstechnik identifiziert (Kap. 5.2, S. 76) sowie Versuche mit unterschiedlichen Verbindungstechniken durchgeführt (Kap. 5.3, S. 82). Diese quasistatischen Versuche dienen dazu, einen Überblick über die im Automobilbau gängigen Fügeverfahren bei CFK-Al-Mischverbindungen zu bekommen. Mit Hilfe der Versuchsergebnisse werden die Fügeverfahren untereinander verglichen und Rückschlüsse auf ihre Eignung für die CFK-Al-Mischverbindungen gezogen. So können mit geringem Aufwand besonders geeignete Fügeverfahren für CFK-Al-Mischverbindungen identifiziert werden.

In dem weiterführenden Versuchsprogramm (Kap. 5.4, S. 91) werden dann die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Verbindungstechnik anhand ausgewählter Verbindungstechniken detailliert untersucht. Ergänzend zu den Untersuchungen mit Fügung im Karosseriebau werden äquivalente Untersuchungen mit Fügung in der Montage, die den aktuellen Stand der Technik repräsentieren, durchgeführt.

Aufbauend auf den Ergebnisse der Grundlagenversuche (bestehend aus den quasistatischen Versuchen unterschiedlicher Fügeverfahren und dem detaillierten Versuchsprogramm der wesentlichen Einflussfaktoren) findet eine Optimierung der Mischverbindungen statt (Kap. 6, S. 123), um eine Verbesserung der Verbindungseigenschaften zu erreichen.

## 5.1 Werkstoffauswahl der Fügepartner

Alle Versuche werden so realitätsnah wie möglich durchgeführt, um Laboreinflüsse so gering wie möglich zu halten. Wichtig ist es, die Einflussfaktoren der automobilen Produktion widerzuspiegeln, da hier die größten Unterschiede zur Luftfahrt und zu den bisher gewonnenen Ergebnissen liegen (Kap. 1.3, S. 26). Im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit werden zunächst Werkstoffe der Fügepartner ausgewählt und deren Eignung nachgewiesen werden.

### 5.1.1 Al-Legierung

Für die Mischverbindungen wird eine im Automobilbau gebräuchliche, schnell aushärtende AlMgSi-Legierung für Bleche und Bänder verwendet. Platinen der hier verwendeten Legierung werden für die Herstellung tragender Strukturbauteile eingesetzt. Eine Eignungsuntersuchung dieses Werkstoffs im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit kann entfallen, da er in genau diesem als Referenz gewählten Fertigungsprozess seit längerem in der Serienfertigung eingesetzt wird.

Es werden lediglich die relevanten mechanischen Kennwerte dieser Legierung in den Wärmebehandlungszuständen T4 (lösungsgeglüht, abgeschreckt und kalt ausgehärtet) und T6 (lösungsgeglüht, abgeschreckt und warm ausgelagert auf höchste Festigkeit) [DIN93] aufgenommen. Diese Ausgangsdaten werden zur Dimensionierung der FKV-Bauteile herangezogen.

### 5.1.2 FKV-Werkstoff

Zur Integration von Bauteilen sowohl im Karosseriebau als auch in der Montage wird ein Material gesucht, das die höheren Anforderungen in Bezug auf die thermische Belastung im Karosseriebau erfüllt. Um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird dasselbe Material auch für die Versuche mit Fügung in der Montage verwendet. Für in der Montage gefügte Bauteile ist die hohe thermische Belastbarkeit des FKV-Materials nicht zwingend erforderlich, da in der Montage gefügte FKV-Bauteile nicht die Trocknungsöfen der Lackiererei durchlaufen.

Da Versuchsergebnisse mit Faserkunststoffverbunden aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren nur schwer übertragbar sind, werden möglichst praxisnahe, für den Automobilbau in Frage kommende Materialien verwendet. Für nicht sichtbare Strukturbauteile ist die optische Qualität der Bauteile nicht relevant. Es kann folglich auf Multiaxialgelege zurückgegriffen werden. Mit trockenem, im RTM-Verfahren infiltriertem Gelege lassen sich kostengünstig hohe Stückzahlen erreichen.

Bei der Verwendung von Multiaxialgelegen können im Vergleich zum Einsatz von Pre-Preg (preimpregnated fibers) die Kosten durch ein automatisiertes Verarbeiten wesentlich reduziert werden, denn durch die Zusammenfassung mehrerer Einzellagen ist ein effizienter Aufbau eines Bauteils möglich. Das Leistungspotential, d.h. die mechanischen Kennwerte (Festigkeit und Steifigkeit) eines MAG liegt bei heutigem Stand der Technik etwa 5% unter dem eines PrePreg-Laminats [KPH00].

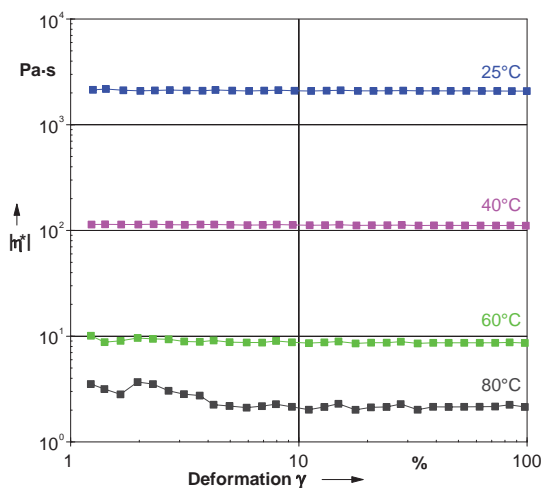
Dimensionierend für den FKV sind die hohen Temperaturbelastungen im KTL Trocknungsöfen von etwa 30 Minuten bei einer Temperatur von  $+200^{\circ}\text{C}$ . Es wird ein Faser-Matrixsystem benötigt, das diese hohen Temperaturen unbeschadet übersteht. Überstehen bedeutet in diesem Fall, dass der Verbund zwar erweichen darf, jedoch noch genügend Eigenstabilität besitzen muss, um verformungsfrei den gesamten Fertigungsprozess zu durchlaufen. Ist kein Abfall der mechanischen Eigenschaften nach der Fer-



tigung festzustellen, ist im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit der Werkstoff für diesen Fertigungsprozess zur Fügung geeignet. Gängige Aushärtetemperaturen für Faserkunststoffverbunde liegen zwischen Raumtemperatur und  $+180^{\circ}\text{C}$ . Sowohl das Harzsystem als auch die Kohlenstofffasergelege sind auf diese Temperaturen ausgelegt.

### 5.1.2.1 Harzsystem

Thermoplastische Matrixwerkstoffe besitzen in der Regel eine höhere Viskosität als duroplastische Matrixwerkstoffe. Dies erschwert die vollständige Infiltration aller Faserfilamente mit einer thermoplastischen Matrix, so dass diese Matrixwerkstoffe bei höherer Temperatur und unter höherem Druck verarbeitet werden müssen. Thermoplastische FKV besitzen in der Regel durch die Verschlaufungen ihrer linearen oder verzweigten Makromolekülketten eine höhere Kriechneigung als stark bzw. voll vernetzte duroplastische FKV-Werkstoffe [Sch07]. Dies wirkt sich vor allem negativ auf das Langzeitverhalten (z.B. Dauerfestigkeiten oder Formtreue) eines thermoplastischen FKV aus.



(a) Rheologiekurven

Messgerät:	UDS200
Hersteller:	Physika
Messspalt:	1mm
Modus:	Oszillation
Frequenz:	1Hz
Prüfkörper:	MP306 (Platte; $\varnothing 25\text{mm}$ )
Vorgabe:	Deformation
Ergebnis:	komplexe Viskosität

(b) Messparameter

Abb. 5.1: Rheologiekurven bei der jeweiligen Messtemperatur

Aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften und der besseren Verarbeitbarkeit wird ein duroplastisches Harzsystem als Matrix für die FKV-Bauteile gewählt. Das gewählte Harz ist wegen seiner niedrigen Viskosität bei  $+80^{\circ}\text{C}$  für eine RTM-Infiltration geeignet, wie die Rheologieuntersuchungen in Abbildung 5.1 (S. 70) zeigen.

Alle Versuchskörper werden im Harzinfusionsverfahren mit Hilfe eines Autoklavs hergestellt. Durch Regulierung des Autoklavdrucks kann der Faservolumenanteil des FKV auch bei unterschiedlichen Faserhalbzeugen auf die im RTM-Verfahren erreichbaren Werte eingestellt werden. Der Autoklavdruck ersetzt hierbei das geschlossene Gesenk einer RTM-Form. Der so hergestellte FKV ist somit mit einem im RTM-Verfahren gefertigten Laminat vergleichbar. Wie die Prozesslinien zeigen, unterteilt sich die Herstellung eines FKV in eine Infiltrationsphase bei  $120^{\circ}\text{C}$  und eine Aushärtungsphase bei  $180^{\circ}\text{C}$  (Abb. 5.2, S. 71). Mit Ausnahme der erwähnten Anpassungen des maximalen

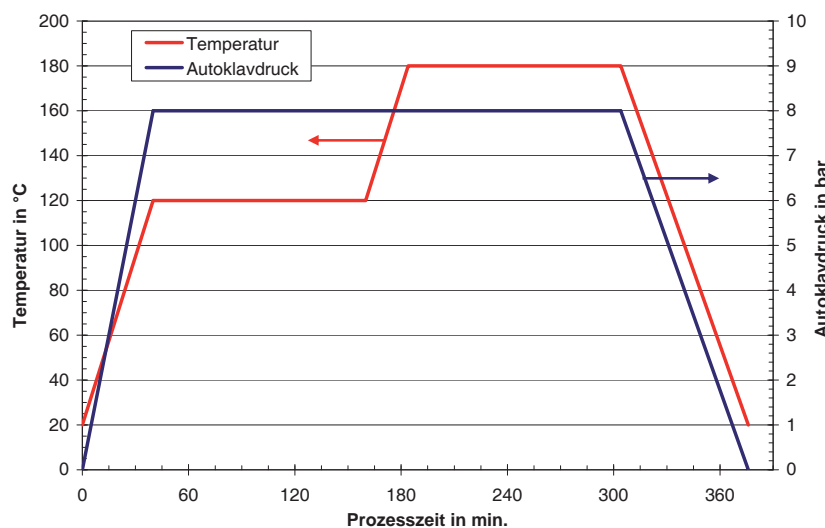


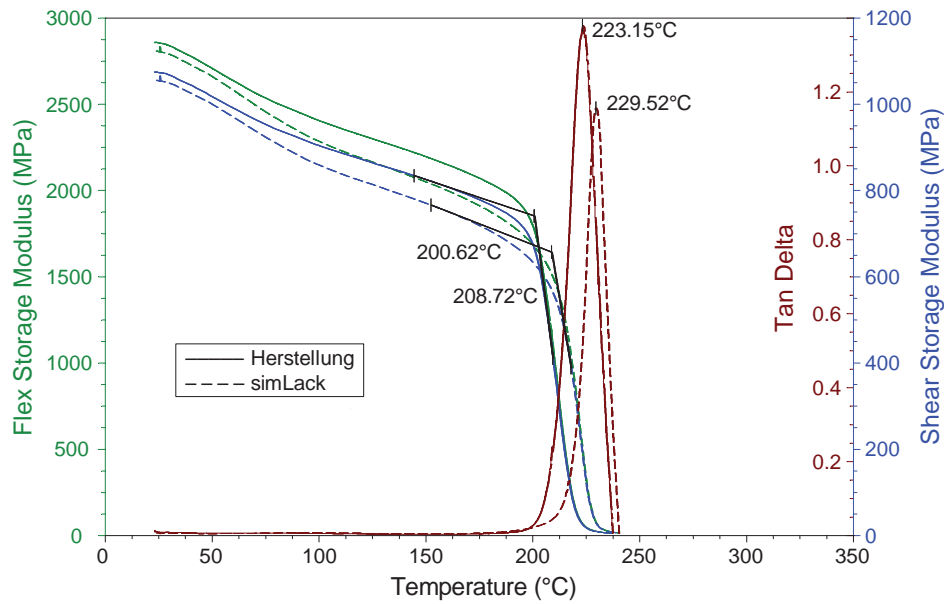
Abb. 5.2: Prozesskennlinien für die Autoklavdruck und das Bauteilvakuum bei der Infiltration und Aushärtung des verwendeten Harzsystems

Autoklavdrucks werden alle in dieser Arbeit untersuchten Lamine mit diesem Zyklus gefertigt. Die gesamte Prozesszeit beträgt 375 Minuten, was für eine automobiler Anwendung erheblich zu lang ist. Die lange Aushärtezeit hat jedoch den Vorteil, dass das gewählte Harzsystem für die Untersuchungen sehr gut verarbeitbar ist.

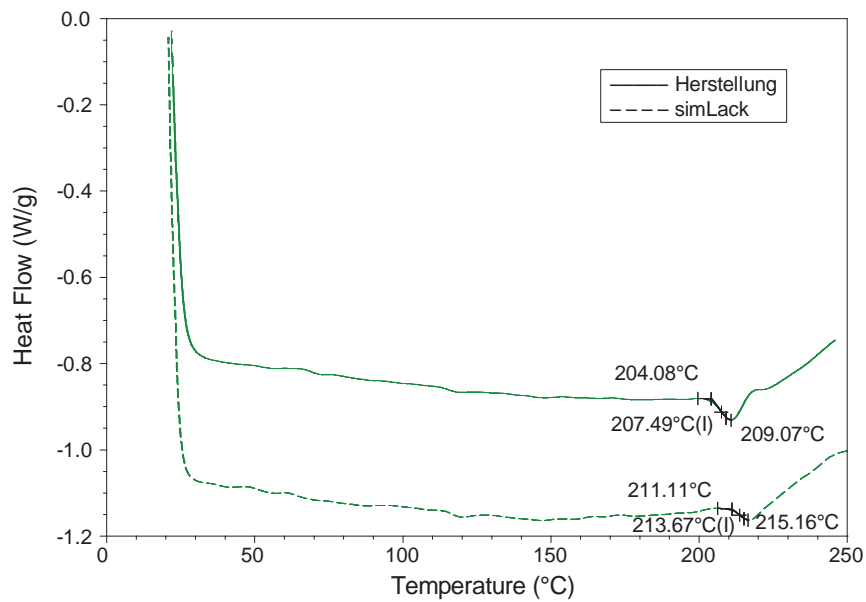
Damit ein Bauteil formstabil bleibt, muss die Glasübergangstemperatur  $T_G$  der Matrix über der thermischen Belastungstemperatur liegen. Die Temperaturbeständigkeit eines Epoxidharzes ist gewöhnlich vom Temperungszyklus abhängig. Idealerweise wird bei einem Harzsystem, das die nötige Temperaturstabilität aufweist, mit zunehmender Temperungstemperatur und -dauer die Glasübergangstemperatur  $T_G$  erhöht. Die mechanischen Eigenschaften des Harzes bleiben dabei nahezu gleich bzw. fallen geringfügig durch eine Versprödung des nachgehärteten Harzes ab. Auf eine nachträgliche Temperung des hier verwendeten Harzes kann bei dem hier gewählten Prozessverlauf verzichtet werden, da das Harz bereits die nötige Temperaturbeständigkeit von über  $200^\circ\text{C}$  aufweist, was mit Hilfe der dynamisch mechanischen Analyse (DMA) und der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) (Abb. 5.3, S. 73) gezeigt wird.

Weiter wird hier nachgewiesen, dass eine Temperaturbelastung, wie sie im automobilen Fertigungsprozess vorkommt, einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf Eigenschaften des Reinharzes hat. Die realen Fertigungseinflüsse werden durch einen aus der automobilen Produktion abgeleiteten Ersatzprozess mit der Bezeichnung simLack (Anh. A.3, S. 218) simuliert und abgebildet. Dieser Prozess wird bewusst konservativ gewählt, da aufgrund von Störungen die Prozesszeiten der Fertigung variieren können oder Ausbesserungen einen mehrfachen Durchlauf der Karosserie durch die Lackiererei (bis zu sechs Mal) notwendig machen. Die im simLack-Prozess eingebrachte Wärme entspricht einer nachträglichen Temperung, so dass in den DMA- und DSC-Analysen der Reinharzproben (Abb. 5.3, S. 73) eine leichte Erhöhung der  $T_G$  beobachtet wird. Die mechanischen Eigenschaften des Reinharzes werden durch den simLack-Prozess aufgrund der bereits erwähnten Nachhärtung nur geringfügig herabgesetzt.

Somit wird im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit das Reinharz als geeignet eingestuft. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit werden somit alle wesentlichen Kriterien der Fügbarkeit erfüllt. Abgesehen von der Prozesszeit ist das Harzsystem repräsentativ für eine potentielle automobilen Anwendung, da es für das RTM-Fertigungsverfahren geeignet ist und die mechanischen und thermischen Anforderungen erfüllt.



(a) Dynamisch mechanische Analyse (DMA)



(b) Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Abb. 5.3: Reinharzuntersuchungen für das verwendete Harzsystem nach der Herstellung und nach dem simulierten Lackierprozess (simLack)

### 5.1.2.2 Fasermaterial

Während Kohlenstofffasern sich üblicherweise an der Umgebungsluft erst bei ca.  $+1000^{\circ}\text{C}$  zersetzen, ist in den meisten Fällen die Schlichte auf den Fasern auf Epoxid- oder Polyurethanbasis nur für den Einsatz bis maximal  $+180^{\circ}\text{C}$  ausgelegt. Da die Schlichte zu den Betriebsgeheimnissen der Faserhersteller gehört, ist sie eine noch zu prüfende Unbekannte. Bei einer kurzzeitigen Belastung von 45 Minuten bei  $+200^{\circ}\text{C}$  wird bei einem entsprechend ausgehärteten und getemperten Laminat kein Festigkeitsverlust erwartet, da die Glasübergangstemperatur  $T_G$  des Harzsystems bei über  $+200^{\circ}\text{C}$  liegt und die Schlichte vollkommen mit dem Harz reagiert hat und ausgehärtet ist.

Geprüft werden die zwei in Tabelle 5.1 (S. 74) aufgelisteten Gelegetypen unterschiedlicher Hersteller mit Schichten auf Epoxidbasis. Dabei sind die beiden Kohlenstofffasern des bidirektionalen Geleges Nr. 1 mit einem PES-Garn konfektioniert. Bei Gelege Nr. 2 sind die unidirektionalen Fasern zur Konfektionierung mit Hilfe eines PES-Garns mit einzelnen in einem Abstand von etwa  $5\text{mm}$  unter  $90^{\circ}$  verlaufenden Glasfaserrowings vernäht. Mit dieser Anordnung ergibt sich ein Flächengewicht von  $9.5 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$  für die Glasfaserrowings.

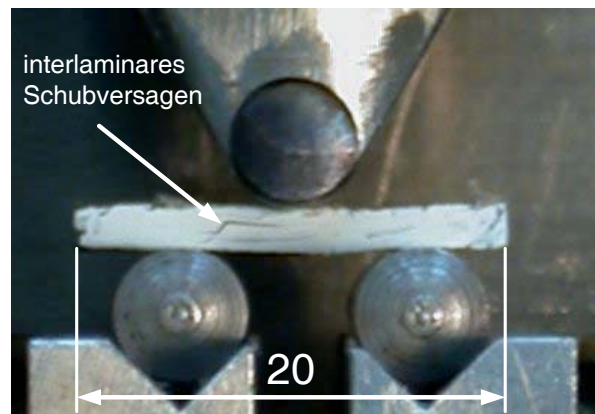
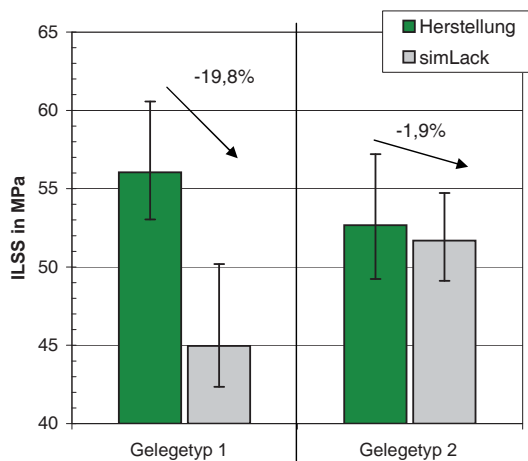
Tab. 5.1: Daten der verwendeten Gelegetypen

Nr.	Fasertyp	Konfektionierung	Orientierung	Flächengewicht
1	HTA	PES	$\pm 45^{\circ}$	$540 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$
2	Industriefaser	PES & Glas	$0^{\circ}$	$300 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$

### 5.1.2.3 Faser-Matrix-Kombination

Um eine vorzeitige Materialschädigung der Faser-Matrix-Kombination durch die hohen Temperaturen im automobilen Fertigungsprozess auszuschließen, wird die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit nach DIN-EN 2563 (ILSS) [DIN97] beider mit dem ge-

wählten Harz infiltrierten Faserhalbzeuge (Tab. 5.1, S. 74) mit bidirektionalem Aufbau ( $[0/90]_{2S}$ ) vor und nach dem simLack-Prozess geprüft. Aus den Dreipunktbiegeversuchen am kleinen Balken können Rückschlüsse auf die Faser-Matrix-Haftung gezogen werden. Unerwarteter Weise fallen die ILSS-Werte (Abb. 5.4, S. 75) bei Fasertyp 1 um ca. 20% ab. Dagegen ist bei Fasertyp 2 kein Festigkeitsverlust zu erkennen. Da die mechanischen Werte des Reinharzes durch die Temperaturbelastung nicht wesentlich verändert werden und die Kohlenstofffaser selbst erst bei Temperaturen ab etwa  $+1000^{\circ}\text{C}$  degradiert, ist dieser Abfall der Faser-Matrix-Haftung durch eine thermische Zersetzung der Schlichte zu erklären.



(a) ILSS Werte von Fasertyp 1 und 2 [MPa]

(b) Bruchbild eines ILSS-Versuches

Abb. 5.4: ILSS-Versuche von Fasertyp 1 &amp; 2

**grün:** unbehandelt; **grau:** nach dem simLack-Prozess (A.3)

Aus diesem Grund wird der kostengünstigere Fasertyp 2 gewählt. Das Gelege besteht aus einer  $50k$  Industriefaser. Zusätzlich zur konfektionierenden Vernähung ist das Gelege mit einem Epoxidharz gebündert. Dies ermöglicht eine einfache, verzugfreie Handhabung des trockenen Faserhalbzeugs. Für nicht sichtbare Strukturbauteile ist die Qualität der Kohlenstofffaser und des Geleges vollkommen ausreichend, da keine optischen Anforderungen zu erfüllen sind.

Um den Nachweis zu erbringen, ob der FKV-Werkstoff in der Automobilindustrie eingesetzt werden kann, müssen alle wesentlichen mechanischen Kennwerte vor und nach der Temperaturbelastung abgeprüft werden. Um eine allgemeine Aussage über die Eignung des Werkstoffs machen zu können, werden mittels Grundwerkstoffversuchen faser- und matrixdominante Kennwerte ermittelt (Tab. 5.2, S. 76). Die Versuche zeigen, dass sich Steifigkeiten und Festigkeiten vor und nach dem simLack-Prozess nur in geringem Maße unterscheiden. Diese detektierten Unterschiede sind auf Schwankungen im Herstellungsprozess bzw. auf eine Nachhärtung und eine damit stattfindende Versprödung des Harzes durch die zusätzliche Wärmelast zurückzuführen.

Somit ist die Eignung des Werkstoffs im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit für die Faser-Matrix-Kombination mit dem Gelegetyp 2 für einen Einsatz im automobilen Karosseriebau nachgewiesen.

Tab. 5.2: Einfluss des simLack-Prozess auf Laminatenschaften des Grundwerkstoffs im Vergleich zum unbehandelten Laminat ( $\hat{=}$  100%)

Prüfung	Laminat	Festigkeit	E-Modul	G-Modul
Zugversuch [DIN96b]	$[0^\circ]_{4S}$	106%	99%	-
Zugversuch [DIN96b]	$[90^\circ]_{4S}$	115%	96%	-
Zugversuch [DIN98b]	$[\pm 45^\circ]_{2S}$	96%	103%	104%
Zugversuch [DIN96b]	$[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ]_S$	91%	95%	-
ILSS [DIN97]	$[0^\circ]_{3S}$	101%	-	-

## 5.2 Einflussfaktoren auf die Verbindungstechnik

Um eine Verbindungstechnik für den späteren Einsatz im Karosseriebau einschätzen zu können, sind Untersuchungen unterschiedlicher Einflussfaktoren erforderlich. Die Abdeckung aller Einflüsse verlangt einen großen Versuchsaufwand, da viele Einflüsse voneinander abhängen. Die wichtigsten Einflüsse für Mischverbindungen sind:

1. Spannungen aufgrund unterschiedlicher Wärmedehnung ( $\Delta\alpha$ -Problematik)
2. Alterung / Korrosion
3. Belastungsart / -geschwindigkeit (quasistatisch, Crash, Dauerfestigkeit)

Diese Einflussfaktoren werden zunächst qualitativ erfasst und anschließend soweit möglich in den folgenden detaillierten Versuchsprogrammen quantitativ untersucht.

### 5.2.1 Wärmedehnung / $\Delta\alpha$ -Problematik

Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten eines FKV und von Aluminium ist die Verbindung dieser unterschiedlichen Materialien nur bei der Füge- bzw. der Aushärtetemperatur (eines Klebstoffs) spannungsfrei. Äquivalent zu den orthotropen mechanischen Eigenschaften eines CFK-Verbunds weist der Wärmeausdehnungskoeffizient der Einzelschicht ebenfalls ein winkelabhängiges Verhalten auf (Abb. 5.5a, S. 78). Durch mechanische Kopplung mehrerer Lagen kann der Wärmeausdehnungskoeffizient zusätzlich variieren, wie der Wärmeausdehnungskoeffizient eines Kreuzverbunds in Abbildung 5.5b (S. 78) anschaulich macht.

Als Referenz sind zusätzlich die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Stahl eingetragen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient eines beliebigen FKV ist also vom Lagenaufbau abhängig, wie Abbildung 5.5c (S. 78) zeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Anpassung des Wärmeausdehnungskoeffizienten durch einen entsprechend gewählten Winkelverbund nur sehr bedingt möglich ist. Ein FKV mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten im Bereich dem der Metalle weist wegen seiner Lagenwinkel keine hohen Steifigkeiten und Festigkeiten auf.

Da die Karosserie eine hohe Steifigkeit und Festigkeit benötigt, müssen die strukturellen Verbindungen diesen Anforderungen genügen. Der Einsatz beispielsweise weicher, dickschichtiger Klebstoffe, wie sie zum Verkleben der Frontscheiben verwendet werden,



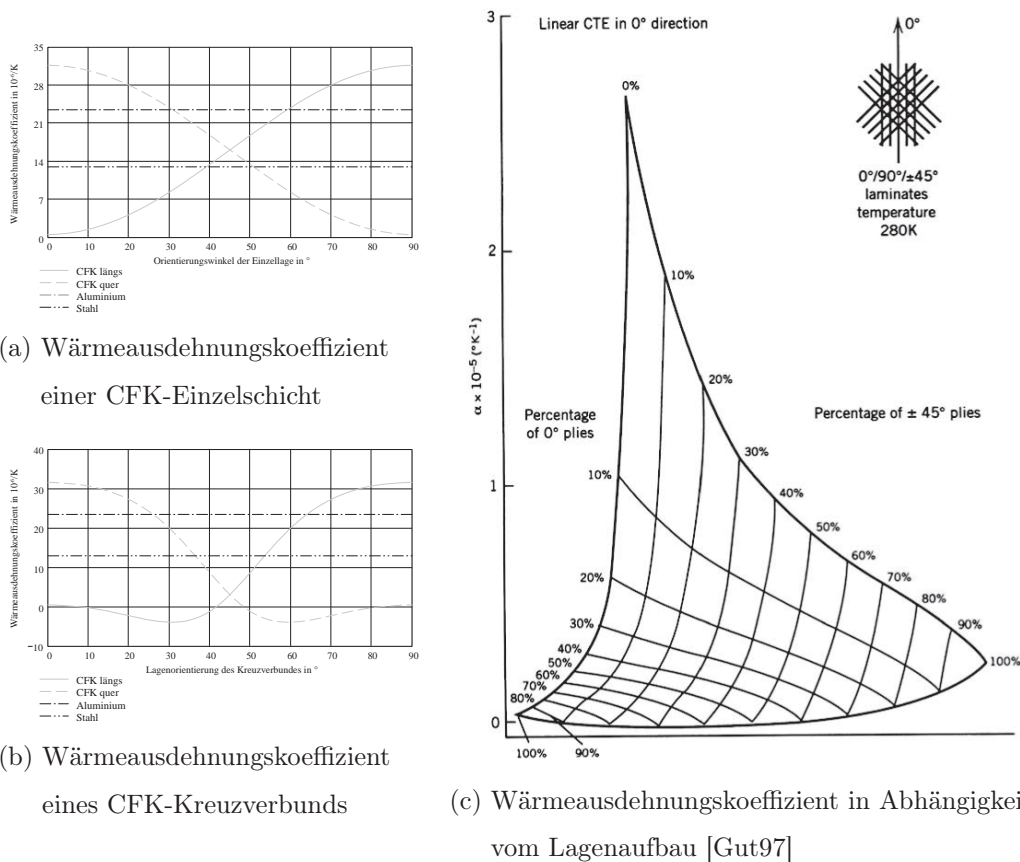
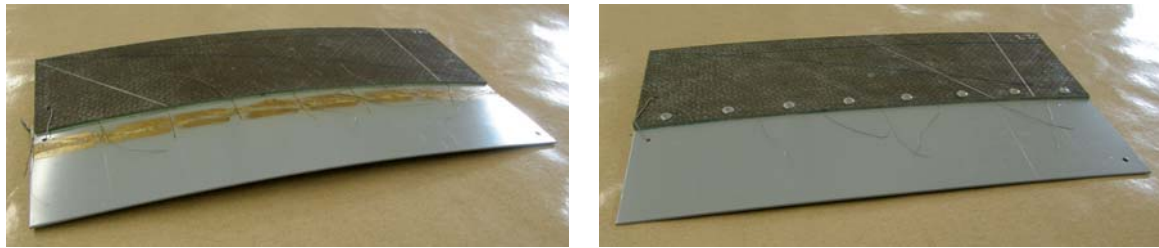


Abb. 5.5: Abhängigkeit des Wärmeausdehnungskoeffizienten von Faserwinkel und Lagenaufbau; Berechnung mit der KLT für das verwendete Material [YK00]

scheidet somit aus. Beim Einsatz heißhärtender Karosserieklebstoffe dagegen werden beim Aushärtprozess thermische Spannungen eingefroren.

Es kommt in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Fügepartner zu einem Verzug der Bauteile. Dieser Verzug kann durch die lokale Fixierung mit Hilfe mechanischer Elemente reduziert werden, wie die Versuche an Probestplatten mit einer Breite von 400mm zeigen (Abb. 5.6, S. 79). Durch die Wärmedehnungen kommt es zu einer Belastung der mechanischen Elemente und zu einer Belastung der Fügepartner. Zum einen müssen diese Spannungen ertragen werden, zum anderen kann es bei einem ungünstigen Steifigkeitsverhältnis der Fügepartner bei zu großem Abstand der mechanischen Elemente zu einer Taschenbildung zwischen den Elementen kommen, die zu einem Ausknicken



(a) Elementar gefügte Probeplatte  
(Karosseriebauklebung)

(b) Kombiniert gefügte Probeplatte  
(Blindnietklebung im Karosseriebau)

Abb. 5.6: Probeplatten bei Raumtemperatur gefügt mit Klebstoffaushärtung im Karosseriebau

des Aluminiums führen kann (Abb. 5.7, S. 79). Eine dadurch hervorgerufene Vergrößerung des Klebespalts kann derart beschaffen sein, dass dieser nicht durch den Klebstoff überbrückt werden kann und somit eine Herstellung der Verbindung unmöglich wird.

Der Mindestabstand für die Niete bzw. der Verzug verklebter Proben kann für eine grobe Vorauslegung bei einfacher Geometrie des Fügebereichs mit einfachen Annahmen mit Hilfe der klassischen Laminattheorie und dem vierten Euler'schen Knickfall vorhergesagt werden [Gro08]. Dabei werden die Klebschicht und der Al-Fügepartner entsprechend ihrer Dicke und Steifigkeit als zusätzliche Laminatlagen behandelt. Eine

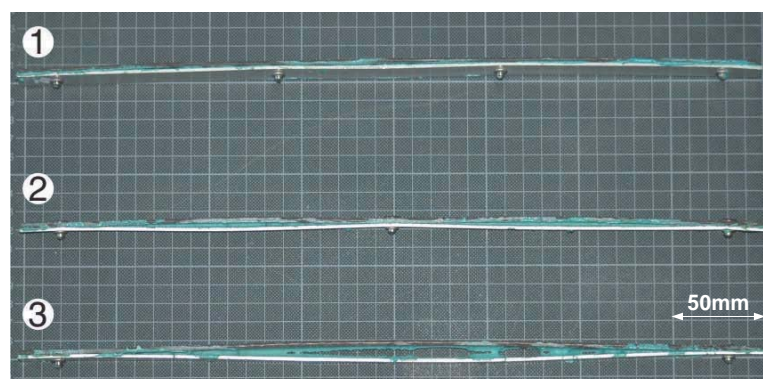


Abb. 5.7: Taschenbildung nach Aushärtung eines Karosseriebauklebstoffs

Nietabstände: 1. 120mm, 2. 180mm, 3. 360mm

Versteifung eines Fügepartners z.B. durch eine Profilgeometrie muss hierbei in eine äquivalente Lagendicke umgerechnet werden. Es ist zu beachten, dass vor dem Aushärten des Klebstoffs dieser noch keine nennenswerte Festigkeit besitzt, so dass es bei Temperaturänderung bis zur Aushärtung des Klebstoffs zu einem Schieben in der Klebschicht und / oder zu einer Verspannung der Fügepartner durch die mechanischen Elemente kommt. Die Taschenbildung (Abb. 5.7, S. 79) zwischen mechanischen Elementen wird mit Hilfe des vierten Euler'schen Knickfalls und den Steifigkeiten der Fügepartner vorhergesagt. So lassen sich die voraussichtlich zu erwartenden Spannungen und Verzüge überschlägig abschätzen.

Eine Vorhersage bei komplexeren, z.B. geometrisch versteiften Bauteilen oder ein Zusammenspiel von verschiedenen Bauteilen ist allgemein nicht möglich. Das komplexe Zusammenspiel verschiedener Bauteile in der Gesamtkarosserie ist analytisch nicht darstellbar. Um die auftretenden Phänomene aufzuzeigen, empfiehlt sich ein Ansatz mit der Finite Element Methode (FEM).

Alle eingefrorenen und auftretenden thermischen Spannungen müssen von der Verbindung zusätzlich zu den Betriebslasten ertragen werden. Somit ist der Verzug durch Wärme von konstruktiver Seite zu betrachten.

### 5.2.2 Alterung / Korrosion

Alterungseinflüsse und Korrosion beeinflussen die Verbindungseigenschaften erheblich. Um den Einfluss abschätzen zu können, werden Versuche mit gealterten Proben durchgeführt. Zur Alterung werden die Proben bei wechselnden Klimabedingungen, im sogenannten Klima Korrosion Test (KKT) [BGKS05], insgesamt 140 Tage ausgelagert. Durch die Anwendung des KKT wird die Alterung der Versuchskörper beschleunigt, so dass der Zeitraum eines Fahrzeuglebens zeitlich komprimiert abgebildet wird. Bei diesem kombinierten Alterungsverfahren treten Schädigungsmechanismen bei der Verbindung durch Feuchtigkeits-, Korrosions- und Temperaturwechselbelastungen auf [Emr03].

Die auffälligste Alterungserscheinung ist das Zersetzen der Grundwerkstoffe und / oder der mechanischen Verbindungselemente durch Korrosion. In der Norm DIN EN ISO 8044 [DIN99] wird Korrosion beschrieben als „physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die eine erhebliche Beeinträchtigung der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese ein Teil bilden, führen kann“. Weiter wird in der Norm angemerkt, dass die Wechselwirkung des Metalls mit seiner Umgebung oft elektrochemischer Natur ist. Das elektrochemische Spannungspotential von Kohlenstoff zu Aluminium in einer 3% NaCl-Lösung beträgt ca. 0,9V. Laut Literatur sind Werkstoffe, die korrosiv belastet sind, nur bis zu einem Spannungspotential von 0,3V miteinander kombinierbar [Sch07].

Bei Verklebungen ist der Einfluss durch Alterung kritisch zu betrachten. Es ist eine Unterwanderungskorrosion der Klebschicht zu erwarten [Hab06], die zusätzlich durch das hohe elektrochemische Spannungspotential verschärft wird [Emr03, FB86]. Dies kann zur Reduktion der adhäsiven Festigkeit bis zum Versagen der Klebung führen.

Deshalb sind weitere Versuche erforderlich, bei denen das CFK-Laminat zusätzlich zur kathodischen Tauchbadlackierung (KTL) mit einem feinen bei der Herstellung einlamierten Glasgewebe (Gl.; E-Glas; Leinwand;  $163g/m^2$  Flächengewicht) von ca. 0,1mm Dicke (Empfehlung des LTH [Arb03]) vom Aluminium isoliert wird. Um ein Unterwandern der Klebschicht von den Seiten und damit eine Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern, werden die einzelnen Proben erst nach der Alterung zugeschnitten.

### 5.2.3 Art der Belastung

Bei der Konstruktion von Verbindungsstellen müssen diese auf ihren dimensionierenden Lastfall ausgelegt werden (Sicherheit der Fügung: Kap. 2.1, S. 35). Ausschlaggebend sind hier Steifigkeits- oder Festigkeitsanforderungen sowie Lage und Funktion der zu verbindenden Bauteile. Steifigkeit und Festigkeit werden durch die Art der Belastung

stark beeinflusst. So ist das Fließverhalten einer Aluminiumlegierung abhängig von der Dehnrate [Ost07] [Bla87]. Während Epoxidharze bei hohen Dehnraten steifer reagieren [GGR02], ist die faserdominierte Steifigkeit eines unidirektionalen CFK nahezu dehnratenunabhängig [Bla87]. Verbunde mit harzdominierten Schichten reagieren mit zunehmender Dehnrate steifer auf die Belastung [GGR02]. Zusammenfassend gilt, dass ein FKV ebenfalls mit zunehmender Dehnrate, mit zunehmender Steifigkeit und / oder zunehmender Festigkeit reagiert [JSF<sup>+</sup>04].

Ein weitere wichtige Belastungsart ist die Betriebs- und Dauerfestigkeit bei geringeren Lasten. Häufig wechselnde Belastungen wirken sich ebenfalls auf die Lebensdauer der Werkstoffe und damit auf die Eigenschaften der Fügung aus. Mit Hilfe von Dauerschwingversuchen [DIN78] werden Wöhlerlinien erstellt, um hier auftretende Effekte sichtbar zu machen.

Um eine Fügung ausreichend beurteilen zu können, ist es notwendig, den Einfluss der wichtigsten Belastungsarten zu untersuchen. Für das Grundlagenversuchsprogramm werden quasistatische Zugscherversuche, Hochgeschwindigkeitszugscherversuche (HZV) und Dauerschwingversuche durchgeführt. Quasistatische Versuche sind in der Durchführung einfach, so dass hiermit schnell Ergebnisse für erste Abschätzungen und Vergleiche geschaffen werden können. Mit der schlagartigen Belastung der HZV und den Dauerschwingversuchen wird zum einen das Verhalten beim Crash, zum anderen die Lebensdauer einer Verbindung einschätzbar.

### 5.3 Untersuchung unterschiedlicher Fügeverfahren

Um die FKV-Bauteile in eine bestehende automobiler Fertigungskette einzugliedern, bietet es sich an, die im Metallbau verwendeten Fügeverfahren auf ihre Tauglichkeit hin abzuschätzen, da deren Einsatzmöglichkeit bereits in mehreren Studien nachgewiesen wurde [HBD<sup>+</sup>04, BMK<sup>+</sup>03]. Fügeverfahren und -verfahren speziell für Faserverbund-

werkstoffe z.B. aus der Luft- und Raumfahrttechnik sind im automobilen Fertigungsprozess aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen in der Fertigung meist nicht einsetzbar.

In den bisherigen Untersuchungen handelt es sich neben den mechanischen Verbindungstechniken überwiegend um Klebungen im Montagebereich mit 2k Klebstoffen. Hochfeste 1k Klebstoffe werden hauptsächlich für rein metallische Verbindungen im Karosseriebau eingesetzt. Ein direkter Vergleich unterschiedlicher Materialkombinationen oder eine Referenzierung der Mischverbindungen auf eine Al-Al-Verbindung wurde weder für mechanische noch für stoffliche Verbindungstechniken durchgeführt (vgl. Kap. 1.3.2, S. 31). In dieser Arbeit wird im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten eine CFK-Al-Verbindung direkt anhand einer äquivalenten Al-Al-Verbindung analysiert und beurteilt.

Für einen allgemeinen Überblick über die Anwendbarkeit der unterschiedlichen Verbindungstechniken werden von den bereits in Kapitel 3 (S. 46) erwähnten Verbindungstechniken geeignete, in der Serienfertigung eingesetzte Verfahren mit den in der Serienfertigung verwendeten Fertigungsparametern ausgewählt und anhand von Zugscherversuchen quasistatisch geprüft. Eine Anpassung der Fertigungsparameter des jeweiligen Fügeverfahrens für die hier verwendeten Materialpaarungen erfolgt nur in einem in der Serienfertigung üblichen Rahmen. Ungeeignete Verbindungstechniken, bei denen keine Fügbarkeit besteht wie z.B. das Schweißen, werden direkt ausgeschlossen. Anhand der quasistatischen Versuchesergebnisse werden die verschiedenen Verbindungstechniken verglichen. Dieses ermöglicht die Ermittlung einer Vorauswahl besonders geeigneter Verbindungstechniken, für die anschließend ein umfangreiches Versuchsprogramm durchgeführt wird, in dem die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Verbindungstechnik (vgl. Kap. 5.2, S. 76) wie die Belastungsart oder die Alterung untersucht werden. Zusammen mit den quasistatischen Ergebnissen aus der Untersuchung unterschiedlicher Fügeverfahren werden Rückschlüsse auf das Verbindungsverhalten der anderen, nicht im Detail untersuchten Verbindungstechniken ermöglicht.

### 5.3.1 Durchführung

Um in den Untersuchungen die hohe Energieaufnahme eines strukturellen und heiß härtenden Klebstoffs zu nutzen, wird der 1k Epoxidklebstoff Betamate 1494 (BM 1494) der Firma DOW als Typvertreter verwendet. Bei den Blindnietverbindungen (Blindniet: Avdel Avibulb 0BN10-03062) wird eine in der Serienfertigung übliche Spielpassung gewählt (4,8mm Blindniet in einer 5,0mm Bohrung), während die andern mechanischen Verbindungselemente (FDS: EJOT M5x17 und Halbhohlstanzniet: Böllhoff 5x6,5mm), ohne ein Vorlochen beider Fügepartner gesetzt werden.

Es werden die in Tabelle 5.3 (S. 85) aufgelisteten Fügeverfahren sowohl elementar als auch kombiniert mittels an die Norm DIN EN 1465 [DIN95] angelegter Zugscherproben getestet. Eine Fügung wird dann als elementare Fügung bezeichnet, wenn die Verbindung mittels eines Fügeverfahrens hergestellt wird. Bei Kombination von zwei oder mehr unterschiedlichen Fügeverfahren wie beispielsweise beim Blindnietkleben wird die Verbindung als kombinierte Fügung bezeichnet. Die für die Untersuchungen angepasste Probengeometrie befindet sich in Anhang A.4 (S. 217).

Für den Einsatz von CFK-Bauteilen im Karosseriebau sind hohe Temperaturen im Trocknungsofen der KTL der begrenzende Faktor. Alle folgenden Temperaturbelastungen in der Fertigung sind von ähnlicher Dauer und niedrigerer Temperatur, so dass ein realer KTL-Durchlauf die Anforderungen der kompletten automobilen Fertigung ausreichend repräsentiert (vgl. Kap. 3.2.3.1, S.59).

Von einer Oberflächenvorbehandlung oder Reinigung der Aluminiumbleche wird abgesehen, um seriennahe Ergebnisse zu erreichen. Die Klebfläche wird lediglich CFK-seitig durch das Abziehen eines Abreißgewebes vorbereitet (Abb. 5.8, S. 86). Beim Kleben auf eine Abreißoberfläche ist zu beachten, dass geringste, mit bloßem Auge nicht sichtbare Rückstände des Abreißgewebes eine trennende Wirkung haben können und so eventuell zu adhäsiven Anbindungsproblemen führen. Dieser Effekt ist abhängig von der Art

Tab. 5.3: Versuchsmatrix elementar und kombiniert gefügter Verbindungen

	Paarung	Fügerichtung	Strukturklebstoff	Fügeelement
elementare Fügungen	Al-Al	$Al \rightarrow Al$	BM 1494	-
	Al-Al	$Al \rightarrow Al$	-	Blindniet
	Al-Al	$Al \rightarrow Al$	-	Fließlochschaube
	Al-Al	$Al \rightarrow Al$	-	Halbhohlstanzniet
	CFK-Al	$CFK \rightarrow Al$	BM 1494	-
	CFK-Al	$CFK \rightarrow Al$	-	Blindniet
	CFK-Al	$CFK \rightarrow Al$	-	Fließlochschaube
	CFK-Al	$CFK \rightarrow Al$	-	Halbhohlstanzniet
	Al-CFK	$Al \rightarrow CFK$	-	Blindniet
	Al-CFK	$Al \rightarrow CFK$	-	Fließlochschaube
kombinierte Fügungen	Al-Al	$Al \rightarrow Al$	BM 1494	Blindniet
	Al-Al	$Al \rightarrow Al$	BM 1494	Fließlochschaube
	Al-Al	$Al \rightarrow Al$	BM 1494	Halbhohlstanzniet
	CFK-Al	$CFK \rightarrow Al$	BM 1494	Blindniet
	CFK-Al	$CFK \rightarrow Al$	BM 1494	Fließlochschaube
	CFK-Al	$CFK \rightarrow Al$	BM 1494	Halbhohlstanzniet
	Al-CFK	$Al \rightarrow CFK$	BM 1494	Blindniet
	Al-CFK	$Al \rightarrow CFK$	BM 1494	Fließlochschaube

des Abreißgewebes und des verwendeten Klebstoffs [FP06]. Heiß härtende Klebstoffe sind gegenüber Rückständen und Oberflächenverschmutzungen wesentlich toleranter als kalt härtende Systeme. Durch den Wärmeeintrag, beispielsweise beim Einbrennen der KTL, wird der Klebstoff besser vernetzt und bindet trotz Oberflächenverschmutzung besser an die Fügepartner an. Abreißgewebe auf Polyesterbasis wie das hier eingesetzte, sind für eine gute Anbindung der Klebschicht geeignet, weil sie in der Regel keine Rückstände auf dem FKV-Bauteil hinterlassen [PFB<sup>+</sup>05]. Eine lichtmikroskopische



sche Untersuchung der Oberfläche lässt keine Geweberückstände erkennen (Abb. 5.8a, S. 86). Bei Betrachtung der Oberfläche mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) sind neben zurückbleibenden Harzfragmenten vereinzelt kleine Polyesterfaserreste des Abreißgewebes zu erkennen (Abb. 5.8b, S. 86). Global betrachtet sind diese Rückstände jedoch zu vernachlässigen, so dass nach dem Entfernen des Abreißgewebes keine weitere Oberflächenvorbehandlung des Fügebereichs nötig ist.

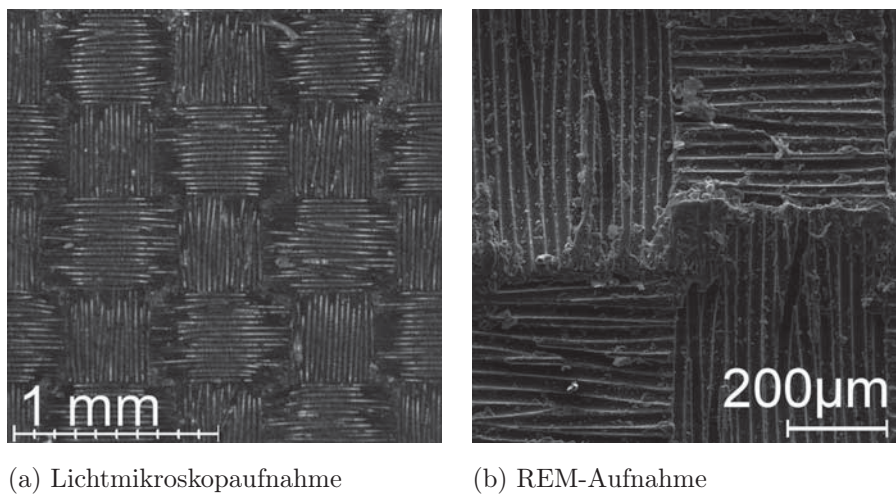


Abb. 5.8: CFK-Oberfläche nach Entfernung des Abreißgewebes

Nach dem Fügen unter Umgebungsbedingungen bei Raumtemperatur durchlaufen die Proben die im Serieneinsatz befindlichen Vorbehandlungsbäder, die Lackbäder und den Trocknungsofen der KTL für eine Aluminium Space Frame Karosseriestruktur. Dieses Verfahren verfolgt mehrere Ziele: Zum einen wird der Strukturklebstoff BM 1494 ausgehärtet und das Aluminium durch die hohen Temperaturen verfestigt, zum anderen werden die Proben lackiert und somit vor Korrosion geschützt.

### 5.3.2 Auswertung

Die Zugfestigkeiten der Zugscherversuche sind in Abbildung 5.9 (S. 87) dargestellt. Die einfarbigen Säulen zeigen die Zugfestigkeiten der elementar gefügten Proben. Dazu

sind die Zugscherfestigkeiten der kombiniert gefügten Proben schraffiert aufgetragen. Diese Proben sind mit dem 1k Strukturklebstoff und zusätzlich mit dem jeweiligen mechanischen Element gefügt. Beim Setzen der mechanischen Fügeelemente ohne Vorloch (Direktverschrauben und Halbhohlstanznieten) wird das Laminat durch das Fügeelement lokal geschädigt.

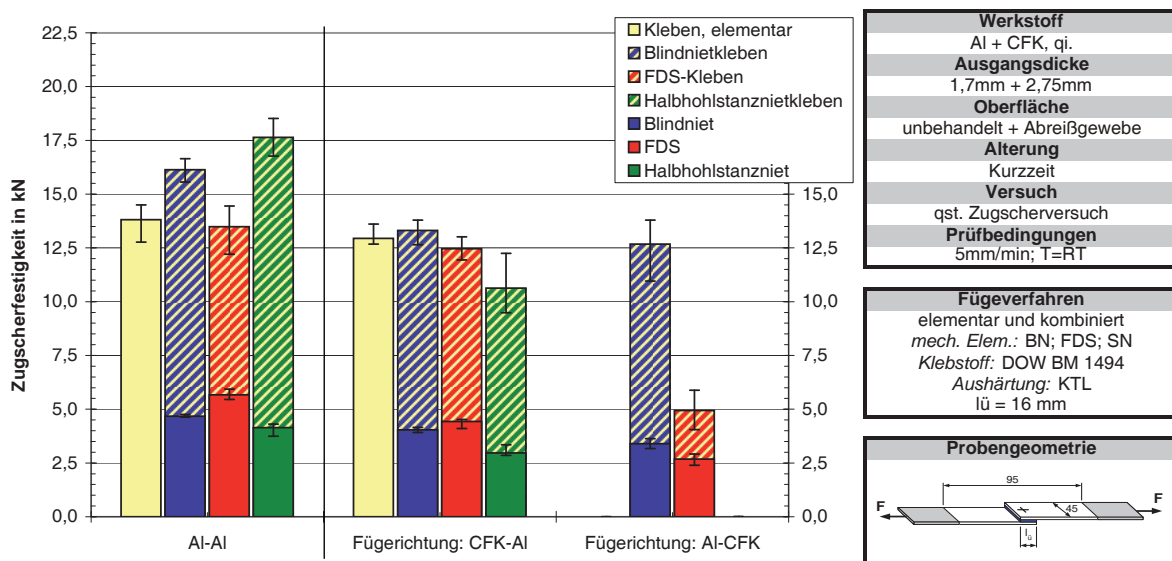


Abb. 5.9: Quasistatische Zugscherfestigkeiten unterschiedlicher Fügeverfahren

Fügung im Karosseriebau

**einfarbig:** elementare Verbindung

**schraffiert:** Mischverbindung: Klebung plus ein mechanisches Element

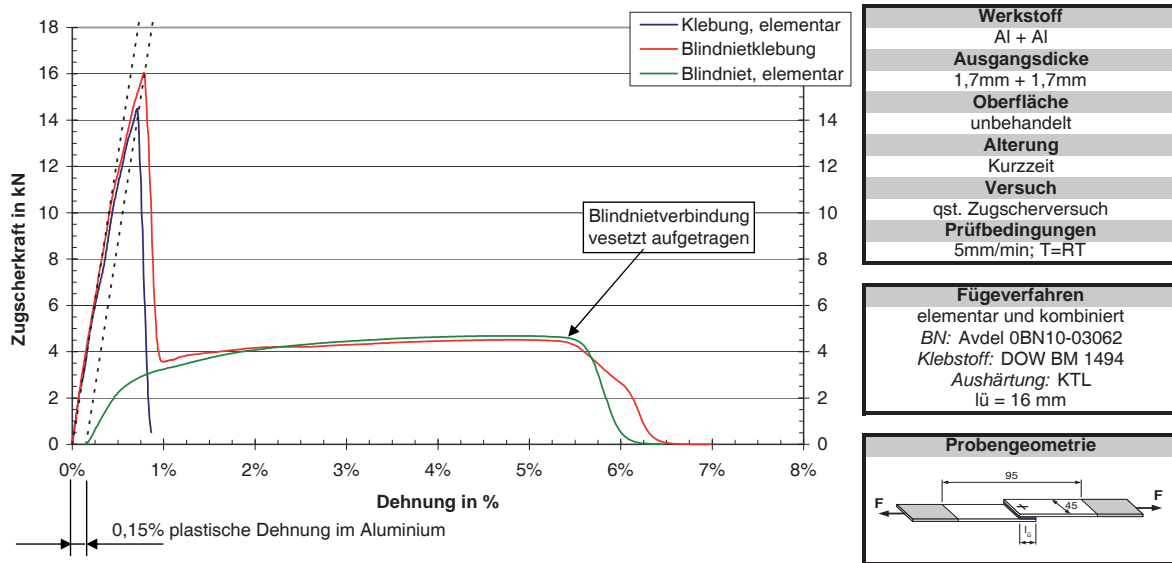
Wie zu erwarten, sind bei den Mischverbindungen nicht alle Fügeverfahren beidseitig anwendbar. Da die Kohlenstofffaser und das Epoxidharz ein sprödes Versagensverhalten und somit kein Fließverhalten aufweisen, kann beim Halbhohlstanznieten in den FKV kein geeigneter Hinterschnitt des Niets ausgebildet werden. Ebenso können beim Direktverschrauben in das CFK keine tragenden Gewindegänge im CFK geformt werden. Die Halbhohlstanznietverbindungen (HSN) mit Fügerichtung von CFK in Aluminium sind wegen des geringen Hinterschnittes des Niets nicht voll tragfähig. Hier kann eine Verbesserung durch einen an den Faserverbundwerkstoff angepassten Niet erreicht wer-

den. Da ein FKV nur ein sehr geringes plastisches Verhalten aufweist, muss der Niet geometrisch derart angepasst sein, dass dieses zu den metallischen Werkstoffen unterschiedliche Materialverhalten berücksichtigt und die Vorschädigung durch den Setzvorgang im FKV minimiert wird. Es werden jedoch Festigkeiten gemessen, die trotz lokaler Schädigung des Laminats für eine Montagefixierung bis zur Aushärtung des Klebstoffs ausreichend sind. Wegen der starken lokalen Schädigung des FKV ist aber kein dauerhaftes Tragverhalten über den Lebenszyklus eines Fahrzeugs zu erwarten.

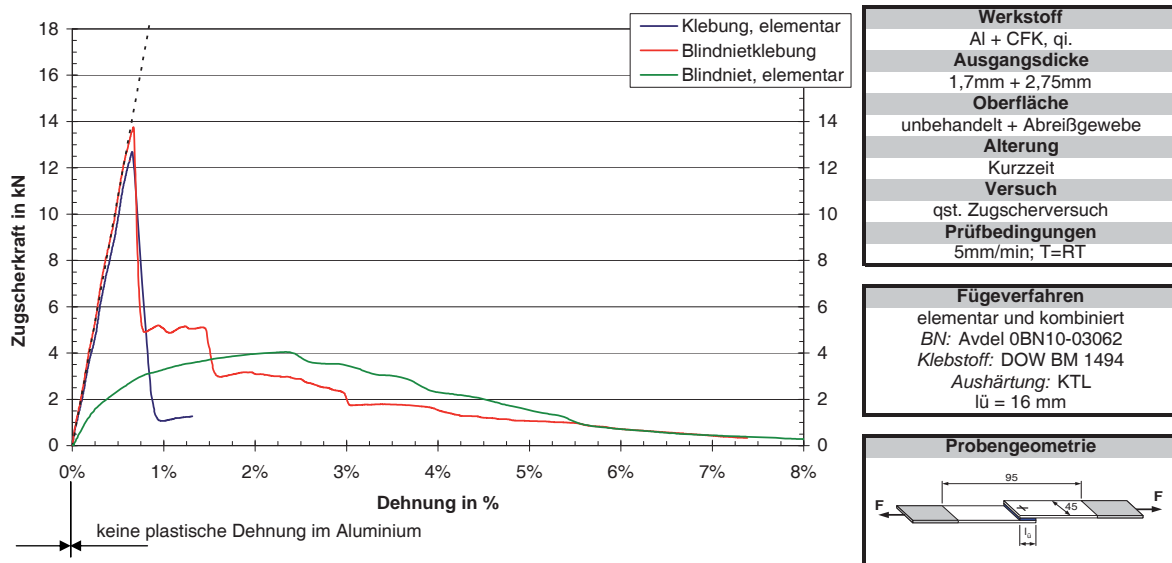
Es ist deutlich zu erkennen, dass bei linienförmiger Anbindung einer Klebung wesentlich höhere Festigkeiten erreicht werden als bei nur punktförmiger Anbindung durch ein mechanisches Element (Abb. 5.9, S. 87).

Während sich in den elementar mechanisch gefügten Blechverbindungen ein Lastniveau unter Fließen des Fügepartnermaterials ausbildet, versagen sämtliche elementar mechanisch gefügten Mischverbindungen vorzeitig durch Lochleibung. Nach dem Erstversagen wird das mechanische Element bei fallender Last so weit durch das CFK-Laminat gezogen, bis der verbleibende Restquerschnitt nicht mehr tragfähig ist und sich die Fügepartner trennen. Dabei ist das Versagensverhalten nahezu unabhängig vom mechanischen Element. Allerdings weisen die Mischverbindungen trotz fehlendem Fließen des Al-Fügepartners einen längeren Weg bis zum Trennen der Fügepartner auf. Bei den Blechverbindungen kommt es primär zu einem plötzlichen Ausscheren oder Ausknöpfen des mechanischen Elements und somit zu einem abrupten Lastabfall. Das Versagensverhalten der Mischverbindung ist wegen des Lochleibungsversagens gutmütiger.

Bei den kombiniert gefügten Proben lässt sich bei allen Versuchen das Versagen in zwei Bereiche aufteilen (Abb. 5.10, S. 89). Das primäre Tragverhalten wird durch den Klebstoff dominiert, während das sekundäre Tragverhalten durch das mechanische Element bestimmt wird. Die Bereiche des ersten und des zweiten Tragverhaltens sind bis auf den plastischen Bereich des Aluminiums nahezu vollständig aus den elementaren Versuchen ableitbar, wie exemplarisch die Kraft-Weg-Verläufe einer Blindnietklebverbindung zeigen. Wird bei den Al-Al-Verbindungen (Abb. 5.10a, S. 89) die elementare



(a) Aluminium-Aluminium-Verbindung



(b) CFK-Aluminium-Verbindung

Abb. 5.10: Kraft-Dehnungsverläufe elementar geklebter, elementar blindgenieteteter und kombiniert blindnietgeklebter Proben  
Fügung im Karosseriebau

Blindnietverbindung um den plastisch verformten Dehnungsanteil des Aluminiums von etwa 0,15% versetzt oder wird die plastische Dehnung durch eine lineare ersetzt, so ist zu erkennen, dass das sekundäre Tragverhalten des Blindnietes identisch mit dem der elementaren Blindnietfügung ist.

Bei den elementar geklebten und kombiniert gefügten Mischverbindungen (5.10b, S. 89) tritt frühzeitig ein Versagen im CFK-Fügepartner auf, so dass die Fließgrenze im Aluminium nicht erreicht wird. Es stellt sich ein nahezu lineares Verhalten im primären Lastniveau ein. Das CFK-Laminat wird durch Schub- und Schälkräfte verursachte interlaminaire Risse geschädigt. Anschließend reißen die obere Harzschicht und Teile der klebschichtnahen Faserlagen mitsamt der Klebschicht vom CFK-Fügepartner ab. Es kommt schließlich zum Lochleibungsversagen durch das mechanische Element (vgl. [KJK<sup>+</sup>06]). Durch die Vorschädigung und das teilweise Fehlen der klebschichtnahen Laminatlagen kommt es zur Reduktion der Lochleibungsfestigkeiten, so dass das sekundäre Tragverhalten der Mischverbindungen der kombiniert gefügten Verbindungen unter dem Tragverhalten der elementaren Verbindung liegt.

Die bei den kombiniert gefügten Mischverbindungen in Abbildung 5.10b (S. 89) erkennbare Zwischenstufe im Zugscherkraft-Dehnungsverlauf im Übergang vom primären zum sekundären Tragverhalten (nach dem Versagen der Klebung) wird ebenfalls durch das interne Versagen im CFK-Fügepartner erklärt. Durch die im CFK-Fügepartner hervorgerufenen Delaminationen in unterschiedlichen Laminattiefen entsteht eine durch das mechanische Element zusammengehaltene mechanische Verzahnung der verschiedenen Laminatschichten und der Klebung. Diese Verzahnung muss bis zum Abgleiten der Fügepartner überwunden werden.

Während die Zugscherfestigkeit der kombiniert gefügten Verbindungen von der Klebung dominiert wird, wird die Energieaufnahme (Abb. 5.11, S. 91) größtenteils durch das mechanische Element bestimmt, weil das Probenverhalten bis zum Versagen der Klebung nahezu rein elastisch ist und einen geringen Dehnungsanteil hat. Beim Tragverhalten

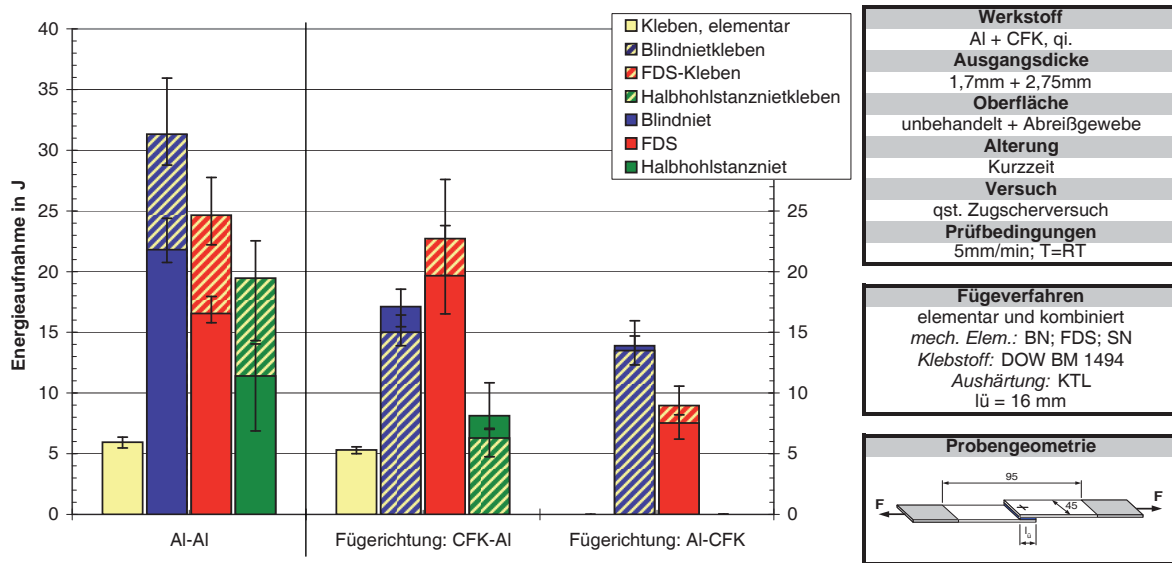


Abb. 5.11: Quasistatische Energieaufnahme unterschiedlicher Fügeverfahren

Fügung im Karosseriebau

**einfarbig:** elementare Verbindung

**schraffiert:** Mischverbindung: Klebung plus ein mechanisches Element

des mechanischen Elements weisen die Versuche dagegen einen größeren Dehnungsanteil auf einem niedrigeren Lastniveau als beim Tragverhalten der Klebung auf.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich die Festigkeiten unabhängig vom mechanischen Fügeelement bei den mechanisch gefügten Proben zwischen  $3,5$  und  $4,5kN$  und bei den geklebten Proben zwischen  $12$  und  $18kN$  bewegen, wobei sich alle Al-Al-Fügungen im oberen und die Al-CFK- bzw. CFK-Al-Fügungen im unteren Festigkeits- und Energieaufnahmebereich bewegen.

## 5.4 Detaillierte Untersuchung der Einflussfaktoren

Die Versuche mit unterschiedlichen Fügeverfahren haben gezeigt, dass Blindnieten bzw. Blindnietkleben sowie Fließlochschrauben bzw. FDS-Kleben am besten für das Fügen

von Mischverbindungen geeignet sind. Damit werden die Erfahrungen vorheriger Untersuchungen bestätigt [HBD<sup>+</sup>04, BMK<sup>+</sup>03]. So konnte mit dem Blindnieten ein manuelles, teilautomatisierbares Fügeverfahren und mit dem FDS-Verfahren ein vollautomatisierbares Fügeverfahren identifiziert werden. Anhand dieser zwei ausgewählten Fügeverfahren werden die wesentlichen Einflussfaktoren aus Kapitel 5.2 (S. 76) detailliert untersucht. Ein Unterschied zwischen diesen Fügeverfahren besteht im Sitz des Fügeelements. Während der Blindniet mit einer Spielpassung eingesetzt wird, sitzt die Fließlochschaube durch die Materialverdrängung beim Formen des Fließlochs in einer Presspassung.

Die Versagenslasten und die Versagensbilder beider Fügeverfahren sind nahezu identisch. In beiden Fällen kommt es bei elementarer mechanischer Fügung zu einem Lochleibungsversagen des mechanischen Elements im faserverstärkten Kunststoff. Bei verklebten Proben entsteht Versagen durch Delaminationen im Faserverbund sowie durch einen Abriss der äußeren Harz- bzw. Harz- und Faserschichten.

Alle mechanischen Fügeverfahren zeigen eine ähnliche Festigkeit und Energieaufnahme. So wird für die weiteren Untersuchungen aufgrund der einfachen Fertigung primär die Blindnietklebverbindung betrachtet. Zur Erweiterung der Datenbasis wird zusätzlich eine FDS-Klebung als Variante im Karosseriebau untersucht. Bei den Karosseriebaulösungen durchlaufen die Proben die reale KTL einschließlich dazugehöriger Vorbehandlung und anschließendem Trocknungsöfen.

Für den Vergleich mit dem Stand der Technik wird als weitere Variante eine Blindnietklebung mit Fügung in der Montage untersucht. Dabei wird der zweikomponentige Klebstoff DP-460 der Firma 3M verwendet. Die Aluminiumbleche durchlaufen hierbei vor dem Fügen die reale KTL.

Bei allen folgenden Untersuchungen wird im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen (Kap. 5.3, S. 82) ein Edelstahlblindniet der Firma Avdel mit der Bezeichnung Avinox 0BE61-00614 verwendet. Der Wechsel des Fügeelements ist zum einen darin begrün-

det, dass ein Blindniet mit höheren Festigkeiten benötigt wird, um sicher zu stellen, dass bei den folgenden Optimierungsschleifen ein Versagen im Fügepartner und nicht im Fügeelement stattfindet. Zum anderen ist bei den geplanten Alterungsversuchen bei Verwendung eines Stahlblindnietes trotz KTL mit starker Korrosion aufgrund des chemischen Spannungspotentials zwischen der Kohlenstofffaser und dem Stahl bzw. Aluminium zu rechnen. Zusätzlich wird das Versuchsprogramm durch die bereits in Kapitel 5.2.2 (S. 80) erwähnte Verbindungskonfiguration erweitert. Hier wird das Laminat zur besseren Isolation vom Al-Fügepartner durch ein feines Glasfasergewebe auf der Kontaktseite ergänzt.

Zur Reduktion des Probenaufwands werden ausschließlich kombiniert gefügte Proben betrachtet. Dies ist problemlos möglich, da sich das Tragverhalten der kombiniert gefügten Proben nahezu exakt aus dem Tragverhalten der elementaren Fügungen zusammensetzt. Somit ist es möglich, das Verhalten der elementaren Fügungen aus den Versuchsergebnissen der kombiniert gefügten Proben abzuleiten.

Zusätzlich wird bei den Al-Fügepartnern die Walzrichtung der gefertigten Proben von quer zu senkrecht zur Prüfrichtung geändert. In dieser Ausrichtung liegen die Fließgrenze und die Festigkeit des Werkstoffs niedriger. Dieser Fall stellt die kritischere Belastung dar, was anhand von Zugversuchen nachgewiesen wird. Auf die Steifigkeit des Werkstoffs hat diese Maßnahme keinen Einfluss.

### 5.4.1 Änderungen zu den bisherigen Untersuchungen

Im Vergleich zu den Vorversuchen liegen die Festigkeiten bei den Blechverbindungen höher, während bei den Mischverbindungen ein Festigkeitsabfall im Vergleich zu den Vorversuchen zu beobachten ist. Im Gegensatz zu den Vorversuchen weisen die quasistatischen Zugscherversuche der Blechverbindungen eine um ca. 12% höhere Zug-scherfestigkeit und eine 2,5-fache Energieaufnahme auf (Abb. 5.12, S. 94), während die Mischverbindungen geringere Versagenskräfte und eine nur unwesentlich veränder-



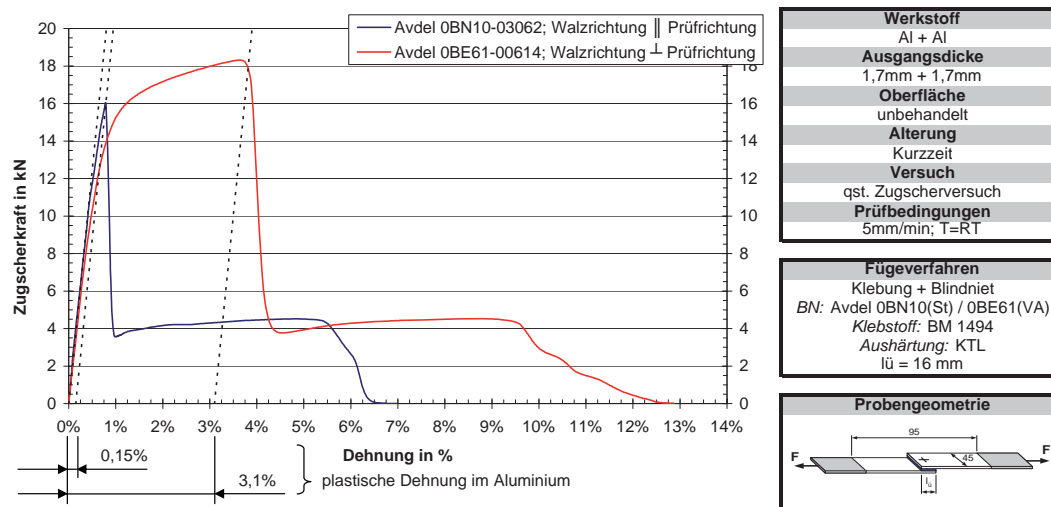


Abb. 5.12: Gegenüberstellung der Kraft-Dehnungsverläufe der Blindnietklebungen  
Fügung im Karosseriebau

**blau:** Stahlblindniet & Walzrichtung || Prüfrichtung (Vorversuche)

**rot:** Edelstahlblindniet & Walzrichtung ⊥ Prüfrichtung

te Energieaufnahme zeigen. Die Kraft-Dehnungsverläufe der Blechverbindungen zeigen deutlich, dass die höhere Maximallast zu einem höheren plastischen Anteil des Aluminiums auf hohem Lastniveau führt, wobei die Fläche unter der Kurve, die äquivalent zur Energieaufnahme ist, erheblich vergrößert wird. Diese hohen Energieaufnahmen können bei den Mischverbindungen nicht erreicht werden. Die ertragbaren Maximallasten sind zu gering, um in den plastischen Bereich des Aluminiums zu gelangen. Zusätzlich ist nur der Al-Fügepartner in der Lage zu plastifizieren.

Die höhere Maximallast ist nicht alleine auf die Verwendung des Edelstahlblindniet zurückzuführen. Da dieser höhere Festigkeiten und eine höhere Setz- / Anzugsfestigkeit als der bei den Vorversuchen verwendete Stahlblindniet besitzt, entstehen höhere Anpresskräfte, die sich positiv auf die Klebfestigkeiten und die anschließenden Blindnietfestigkeiten des sekundären Lastniveaus auswirken [Hab06] [Sch07] [SKN+08]. Zusätzlich führen die höheren Nietfestigkeiten zu einem Ausscheren des Blindniet aus dem setzseitigen Al-Fügepartner und nicht zu einem Nietabriss wie bei den Vorversuchen am Ende des zweiten Lastniveaus.

Zum größeren Teil ist das höhere Lastniveau jedoch auf die geänderte Walzrichtung der Al-Fügepartner zurückzuführen. Zugversuche zeigen, dass die  $R_{p0,2}$ -Grenze in Abhängigkeit von der Walzrichtung zwischen  $260$  und  $270\text{MPa}$  liegt. Die bei den Blechverbindungen erreichten Lasten führen bei dem  $1,7\text{mm}$  starken Aluminium zu Spannungen, die genau in diesem Bereich liegen. Durch die geringere Fließgrenze bei quer zur Prüfrichtung gewalztem Aluminium kommt es eher zu plastischen Verformung der metallischen Fügepartner (Abb. 5.13, S. 95).

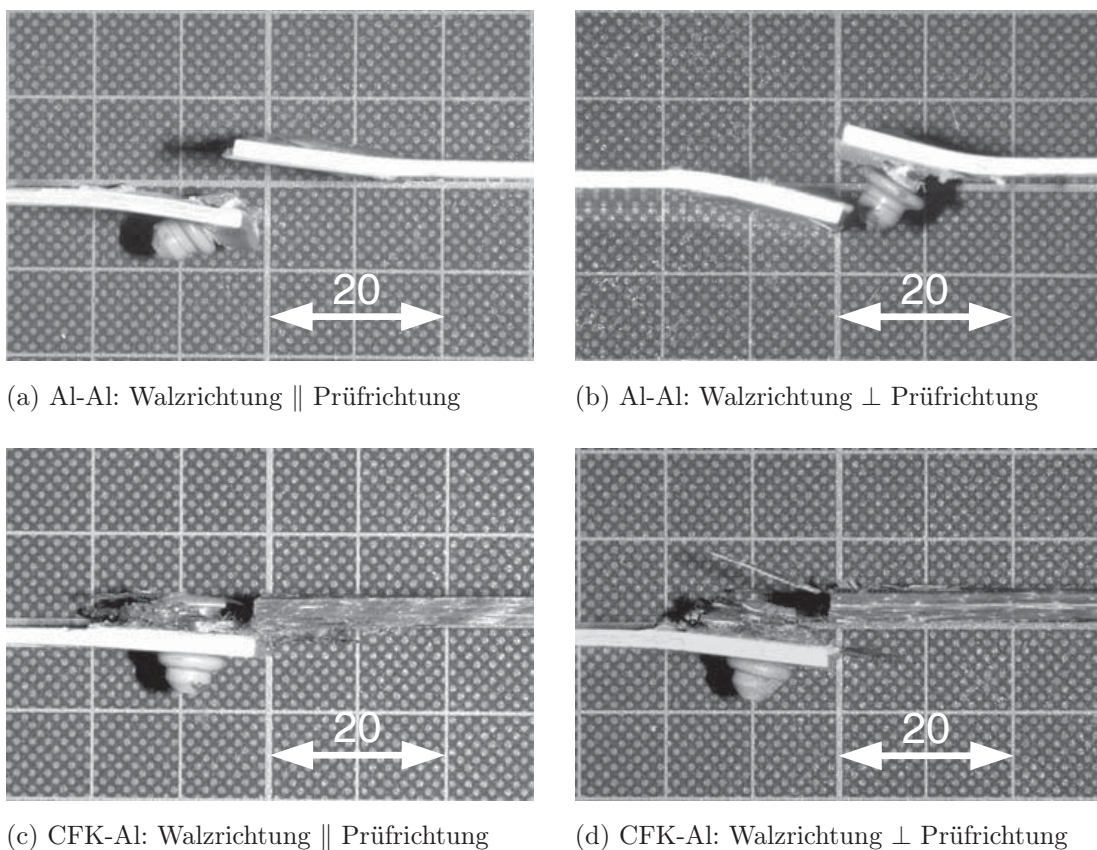


Abb. 5.13: Bleibende plastische Verformung der Fügepartner nach dem Bruch

So werden bei den Blechverbindungen Spannungsspitzen abgebaut bzw. Spannungen durch die Rotation des Fügebereichs umgelagert und eine bessere Ausnutzung des Klebstoffs bewirkt.

Im Gegensatz zu den Blechverbindungen wirkt sich die stärkere Rotation des Fügebereichs nachteilig auf die Festigkeiten der Mischverbindungen aus. Aufgrund der höheren Biegesteifigkeit des CFK-Fügepartners kann eine Umlagerung der Spannungen nicht in gleichem Maße erfolgen. Die höhere plastische Deformation im Aluminium verursacht im CFK höhere interlaminare Schälspannungen. Da bei den Mischverbindungen die Klebstofffestigkeit nicht voll ausgenutzt wird, sondern das interlaminare Versagen des Harzes dimensionierend ist, kommt es zu einem frühzeitigen Versagen. Auf die Energieaufnahme und das sekundäre Tragverhalten sind diese Auswirkungen sehr gering, weil sich die Dehnungen der einzelnen Lastbereiche kaum ändern.

Das Phänomen der großen plastischen Verformung ist gesondert zu beachten und muss unbedingt bei der Versuchsauswertung und der Aufbereitung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

#### **5.4.2 Versuchsprogramm mit Fügung im Karosseriebau**

Um ein Fügen im Karosseriebau umfassend über die Ergebnisse der quasistatischen Vorversuche mit unterschiedlichen Fügeverfahren (Kap. 5.3, S. 82) hinaus zu untersuchen, wird ein detailliertes Versuchsprogramm durchgeführt. Dabei werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Verbindungstechnik sowohl für eine Blindnietklebung (BNK,K) als auch für eine FDS-Klebung (FDSK,K) mit den bereits in Kapitel 5.4 (S. 91) erwähnten Verbindungselementen untersucht. Wie in den Vorversuchen wird der BM 1494 als Klebstoff verwendet. Dabei werden die wichtigen Einflussfaktoren wie die Belastungsart (quasistatisch, schlagartig und wechselnd) und Alterungseffekte durch eine beschleunigte Alterung untersucht. Um die aus der Literatur bekannten Korrosionsschutzmaßnahmen (vgl. Kap. 5.2.2, S. 80) für den Automobilbau abzuschätzen, werden zusätzlich zur normalen Verbindungskonfiguration mit Glasfasergewebe isolierte Verbindungen (Gl.) aufgebaut und getestet. Die im Einzelnen durchgeführten und ausgewerteten Zugversuche sind in Tabelle 5.4 (S. 97) aufgelistet.

Tab. 5.4: Versuchsmatrix im Karosseriebau kombiniert gefügter Verbindungen

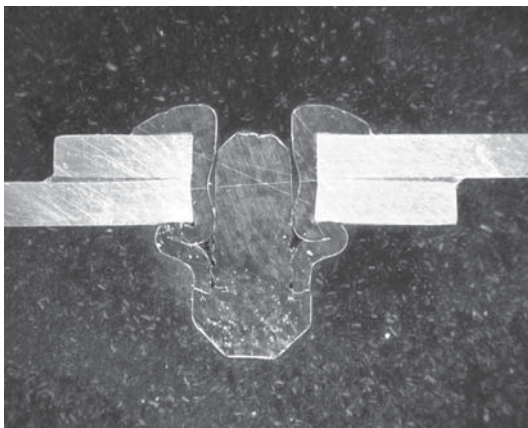
		Belastung	Kurzzeit	140d KKT
BM 1494 + Blindniet	Al-AI	quasistatisch	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X
	CFK-AI	quasistatisch	X	X
		quasistatisch; CFK+Glasgewebe	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X
BM 1494 + FDS	Al-AI	quasistatisch	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X
	CFK-AI	quasistatisch	X	X
		quasistatisch; CFK+Glasgewebe	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X

Die Ergebnisse der beiden Versuchsserien (BNK,K und FDSK,K) zeigen die gleichen globalen Effekte. Dieses bestätigt die Erfahrungen aus den Vorversuche (Kap. 5.3, S. 82). Sie zeigen, dass die auftretenden Effekte nahezu unabhängig vom mechanischen Element sind. Es genügt also, zuerst die geringen Unterschiede zwischen den mechanischen Elementen detailliert und anschließend alle globalen und übertragbaren Effekte anhand der Blindnietklebung zu diskutieren.

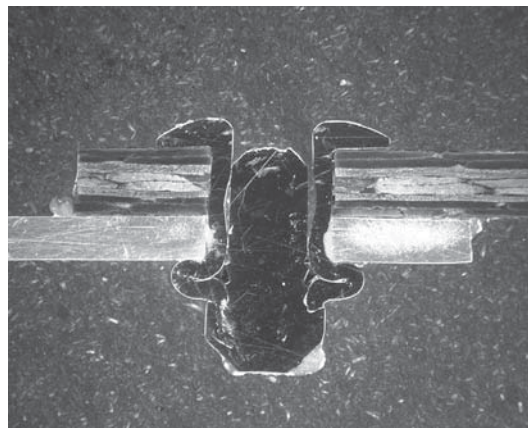
Bei der Auswertung der Kraft-Dehnungsverläufe in Abbildung 5.15 (S. 99) ist festzustellen, dass die FDS-Klebung einen geringeren plastischen Anteil im primären Lastbereich aufweist. Diese geringeren Festigkeiten der Klebung sind auf die unterschiedliche Ausprägung der Klebschicht im Bereich des Fügepunkts zurückzuführen (Abb. 5.14, S.

98). Im Gegensatz zu den Blindnietverbindungen, bei denen die Bleche am Fügepunkt auf Block gezogen werden, entsteht beim FDS-Verschrauben durch die Materialverdrängung der Schraube ein Kragen am Lochrand, der als Abstandshalter fungiert.

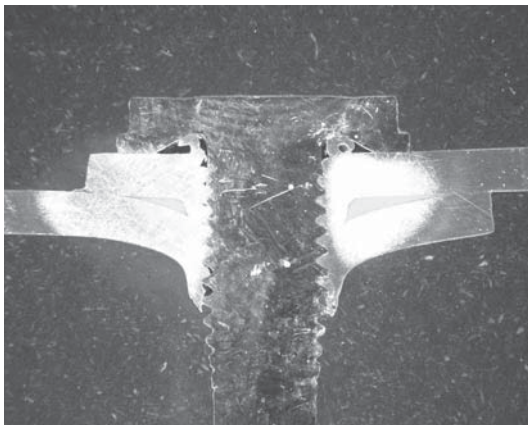
Weiter besitzen die mit der Fließlochschaube gefügten Blechverbindungen ein um ca. 24% höheres und um ca. 23% kürzeres sekundäres Lastniveau (Abb. 5.15a, S. 99). Zum einen werden durch den Presssitz der Fließlochschaube die Lochleibungsfestigkeiten erhöht, zum anderen wird eine Rotation des Fügelements durch den großen Kopf der



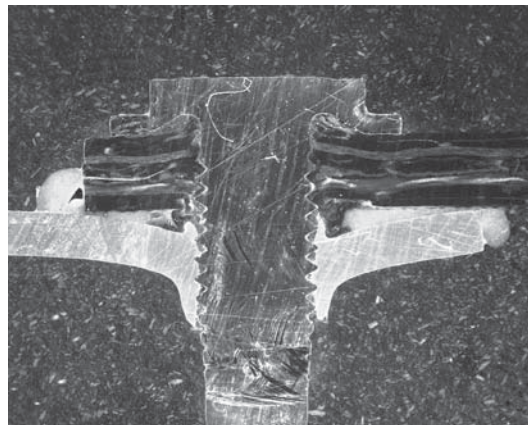
(a) Al-Al: Blindnietklebung



(b) CFK-Al: Blindnietklebung



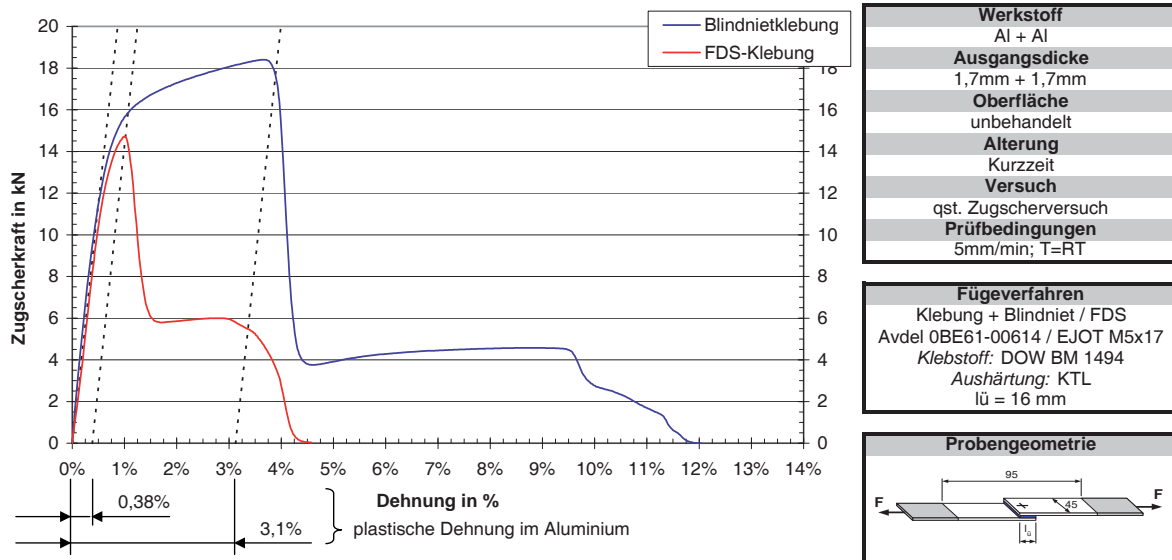
(c) Al-Al: FDS-Klebung



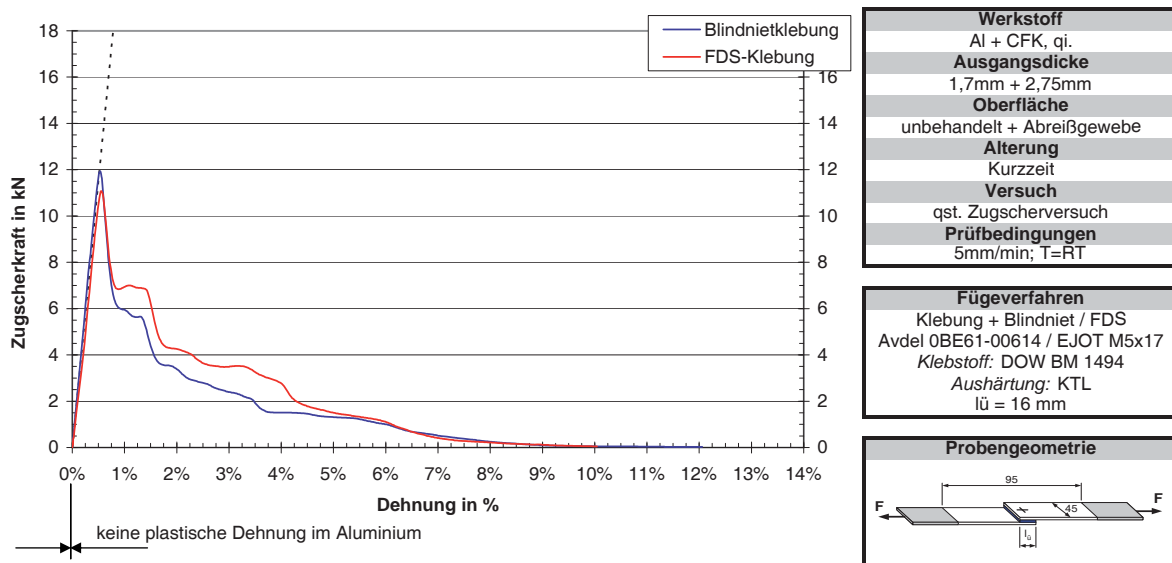
(d) CFK-Al: FDS-Klebung

Abb. 5.14: Schliffbilder bei Fügung im Karosseriebau

Probenmitte; Schliffbildebene || Zugrichtung



(a) Aluminium-Aluminium-Verbindung



(b) CFK-Aluminium-Verbindung

 Abb. 5.15: Kraft-Dehnungsverläufe der Blindnietklebung und der FDS-Klebung  
 Fügung im Karosseriebau

Schraube verhindert. Diese Effekte führen zu den höheren Traglasten bei geringerer Dehnung. Da die Mischverbindungen im sekundären Lastniveau grundsätzlich durch Lochleibung im CFK versagen, kommt es zu einer geringeren Rotation des Fügeelements. Die Dehnung im sekundären Tragverhalten ist primär von dem Weg bis zum Ausreißen des mechanischen Elements abhängig. Hier führen die höheren Lochleibungsfestigkeiten der FDS-Klebung zu einer leicht erhöhten Energieaufnahme (Abb. 5.15b, S. 99), was schon in den Vorversuchen zu erkennen ist (Kap. 5.3, S. 82).

Diese Effekte sind ebenfalls bei den Hochgeschwindigkeitszugscherversuchen festzustellen (Abb. A.2, S. 215). Bei den Mischverbindungen ist dieser Effekt nicht so deutlich ausgeprägt wie bei den Blechverbindungen, weil das Verschrauben ohne Vorloch im CFK zu lokalen Schädigungen führt.

Die Wöhlerlinien der FDS-Klebung zeigen nur einen geringen Unterschied zwischen den Versagensbereichen des Grundwerkstoffes (GW) und der Fügung (Abb. A.3a, S. 216). Beim Vergleich mit der Blindnietklebung (Abb. 5.20a, S. 107) liegen die  $k$ -Faktoren für ein Versagen der Fügung im Bereich der  $k$ -Faktoren für das Versagen im Grundwerkstoff. Durch den Presssitz der FDS hat die Schraube einen größeren lasttragenden Anteil. Ein Schieben der Klebschicht wird behindert, so dass sich die Versagensarten überlagern. Zum Teil kann ein kombiniertes Versagen in der Klebschicht und im Aluminiumgrundwerkstoff vor der FDS beobachtet werden.

Abweichend von den Blindnietklebungen kommt es bei den FDS-Klebungen an der Fließlochschaube aufgrund der Bildung eines galvanischen Elements zu starker Korrosion und starker Rotrostbildung. Die Korrosion ist jedoch noch nicht soweit fortgeschritten, dass die Festigkeit des mechanischen Elements beeinflusst wird. Ein Einfluss der Korrosion auf das Verbindungsversagen kann nicht festgestellt werden. Im Zweifelsfall würde ein Fügeelement aus Edelstahl oder zusätzliche Maßnahmen zum Korrosionsschutz Abhilfe schaffen. Alle weiteren Alterungseffekte sind mit denen der Blindnietklebung identisch.

In den folgenden Kapiteln wird die Blindnietklebung exemplarisch diskutiert. Alle erwähnten Punkte sind mit Ausnahme der bereits diskutierten Unterschiede im gleichen Maße für die FDS-Klebung gültig. Die genauen Ergebnisse der unterschiedlichen Versuche zur FDS-Klebung können in Anhang A.1 (S. 214) nachvollzogen werden.

### 5.4.2.1 Quasistatische Versuche: BNK,K

Bei einer Gegenüberstellung der Maximallasten und der Energieaufnahmen der Blech- und Mischverbindungen (Abb. 5.16, S. 101) ist wie in den Vorversuchen zu erkennen, dass die Mischverbindungen deutlich geringere Festigkeiten und Energieaufnahmen aufweisen. Dieses gilt sowohl für die kurzzeitgelagerten als auch für die mit 140 Tagen KKT beaufschlagten Proben.

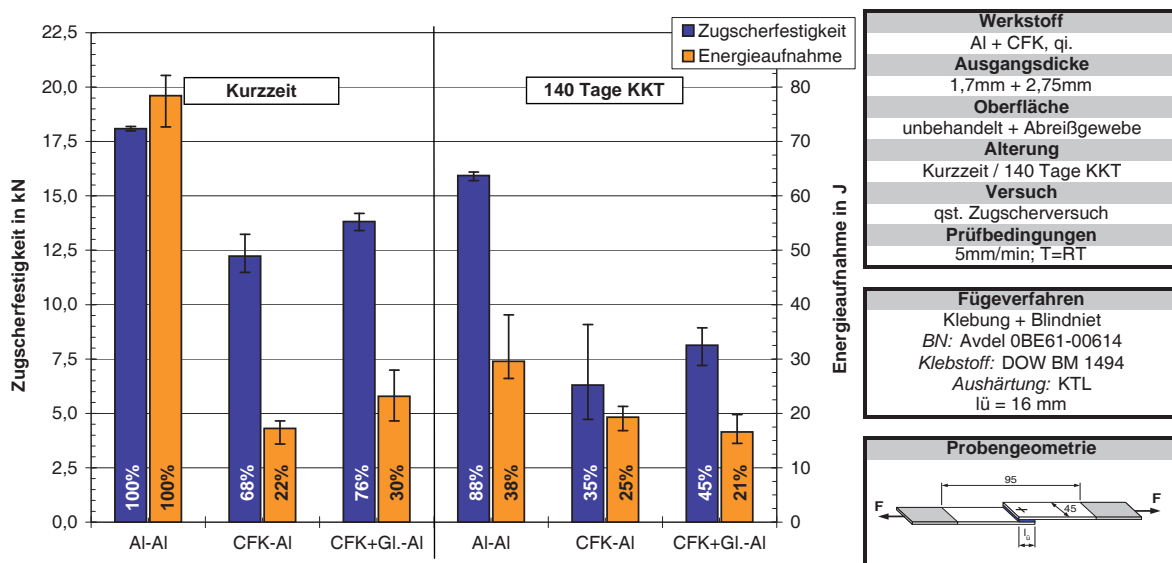


Abb. 5.16: Ergebnisse quasistatischer Zugscherversuche der Blindnietklebung

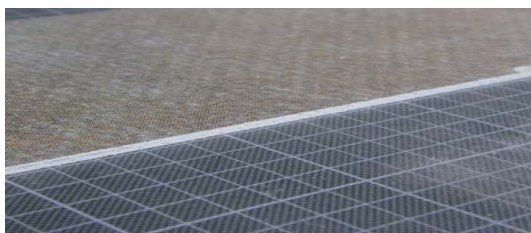
Fügung im Karosseriebau

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

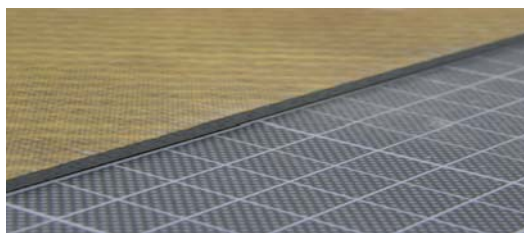
Die Festigkeiten und Energieaufnahmen werden bei den Mischverbindungen durch das isolierende Glasgewebe geringfügig gesteigert, was auf eine homogenere Lasteinleitung



an der Grenzfläche zurückzuführen ist. Durch die geringere Steifigkeit des Glasgewebes entsteht ein weicherer Übergang von der steifen Kohlenstofffaser über die Grenzschicht aus Harz bis zur Klebschicht. Durch die geringeren Steifigkeitssprünge und die Verzahnung des Harzes in der Gewebestruktur werden höhere Festigkeiten erreicht. Zusätzlich werden die inneren CFK-Lagen von Delaminationen durch den Abbau lokaler Spannungsspitzen geschützt. Nach dem Versagen der Klebung bildet sich das Tragverhalten des Blindnietes ähnlich dem der elementaren Blindnietverbindung (vgl. 5.10b, S. 89) aus, was folglich zu höheren Energieaufnahmen führt. Dieses ist auf eine geringere Vorschädigung im Laminat nach Versagen der Klebung als bei den Proben ohne abschließendes Glasgewebe zurückzuführen. Obwohl in der Literatur keine mechanischen Eigenschaftsänderungen durch das Einlegen eines dünnen Glasgewebes erwartet werden [Arb03], ist ein Einfluss erkennbar und eine erste Verbesserungsmaßnahme identifiziert.



(a) CFK nach KTL

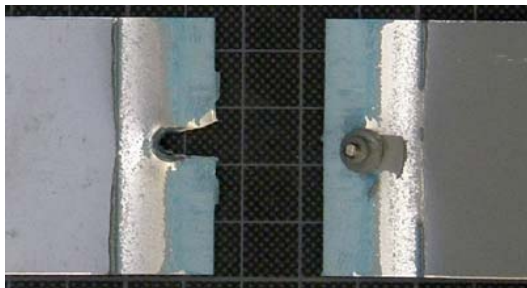


(b) CFK+Glasgewebe nach KTL

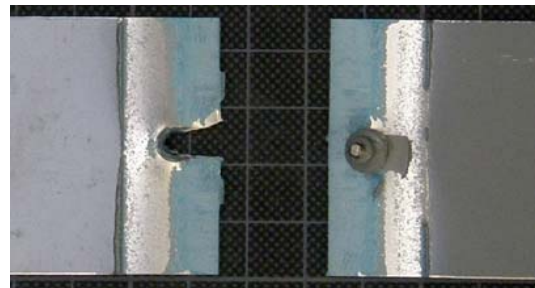
Abb. 5.17: KTL-Annahme des verwendeten CFK

Während der Festigkeitsabfall der Blechverbindung durch die 140 Tage KKT moderat bleibt, sinkt die Festigkeit bei den Mischverbindungen auf etwa die Hälfte ab (Abb. 5.16, S. 101), obwohl die Proben die KTL durchlaufen haben bzw. zusätzlich mit dem Glasgewebe isoliert werden. Beim Durchlauf durch die KTL lagert sich der Lack in einem gescheckten Muster an den Oberflächen des CFK ab (Abb. 5.17a, S. 102). Die Schnittkanten, an denen die Faserenden frei liegen, werden vollständig mit Lack bedeckt. Die zusätzliche elektrische Isolation der CFK-Oberfläche durch das Glasgewebe führt zu einer verbesserten Oberflächenisolation, da keine KTL-Ablagerung auf der Laminatoberfläche, d.h. auf der Fügefläche, beobachtbar ist (Abb. 5.17b, S. 102).

Die Bruchbilder in Abbildung 5.18 (S. 103) zeigen, dass die KTL keinen ausreichenden Korrosionsschutz bietet. Auch der durch das Glasgewebe zu erreichende Effekt einer verbesserten Korrosionsbeständigkeit der Fügung wird nur unzureichend erfüllt. Durch das galvanische Element der Mischverbindung kommt es auf der Seite des weniger edlen Aluminiums zur völligen Unterwanderung der Klebschicht. Es ist auch davon auszugehen, dass die Isolation der mit KTL beschichteten Kanten, vor allem am mechanischen Fügeelement, zu gering ist. Sollte die Verbindung im Nassbereich eingesetzt werden, sind zwingend zusätzliche Maßnahmen wie z.B. eine PVC-Abdichtung vorzunehmen.



(a) Al-Al: Kurzzeit



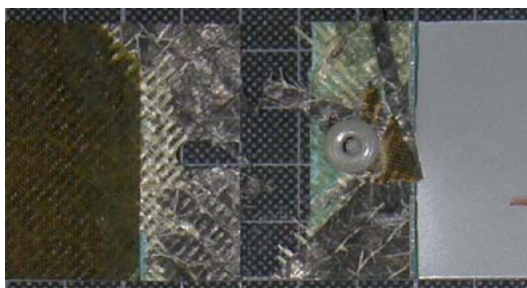
(b) Al-Al: 140d KKT



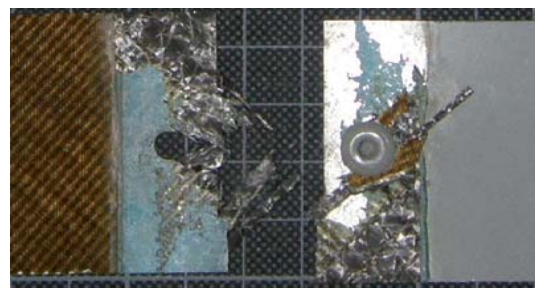
(c) CFK-Al: Kurzzeit



(d) CFK-AL: 140d KKT



(e) CFK+Glas-Al: Kurzzeit



(f) CFK+Glas-Al: 140d KKT

Abb. 5.18: Bruchbilder der quasistatischen Versuche; Fügung im Karosseriebau

Auf die Energieaufnahme hat die Klebschichtunterwanderung nur einen unwesentlichen Einfluss. Bei den Mischverbindungen kommt es nicht zum Plastifizieren des Aluminiums auf dem hohen primären Lastniveau, so dass die Energieaufnahme nahezu vollständig durch das mechanische Element, an dem keine Korrosionserscheinungen festzustellen sind, bestimmt wird.

#### 5.4.2.2 Hochgeschwindigkeitszugscherversuche: BNK,K

Die Hochgeschwindigkeitszugscherversuche werden mit einer Prüfgeschwindigkeit von ca.  $2,5 \frac{m}{s}$  durchgeführt. Durch die hohe Prüfgeschwindigkeit benötigt der Zugkolben eine Vorlaufstrecke zur Beschleunigung. Das schlagartige Einkoppeln bei Versuchsbeginn verursacht trotz einer steifen und leichten Prüfkonstruktion ein Aufschwingen des gesamten Kraftmessstrangs [BLBN04]. Diese Schwingung zeigt sich in den gewonnenen Messdaten, so dass diese für eine Versuchsauswertung numerisch aufbereitet werden müssen. Um auswertbare Kraft-Dehnungsverläufe zu erhalten, wird das von der Prüfmaschine gefilterte Wegsignal verwendet. Das Kraftsignal wird nachträglich mit einem Channel Frequency Class Filter 1000 (CFC-1000) geglättet. Dabei handelt es sich um einen vierpoligen phasenlosen Butterworth-Filter nach der Norm ISO 6484:2002(E) [ISO02].

Prinzipiell verhalten sich die Versuche ähnlich den quasistatischen Versuchen (Abb. 5.19, S. 105). Eine Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Anfangssteifigkeit ist wegen der hohen Streuung bei diesem hochgradig instationären Versuch nicht sinnvoll. Prinzipiell sind die Steifigkeiten kleiner / gleich den Steifigkeiten aus den quasistatischen Versuchen. Die Blechverbindungen besitzen zusätzlich bei gleichen Maximallasten eine geringere Energieaufnahme als bei den quasistatischen Versuchen. Bei Betrachtung der Kraft-Dehnungsverläufe ist ein kürzeres erstes Kraftniveau und damit verbunden ein geringeres Materialfließen zu erkennen.

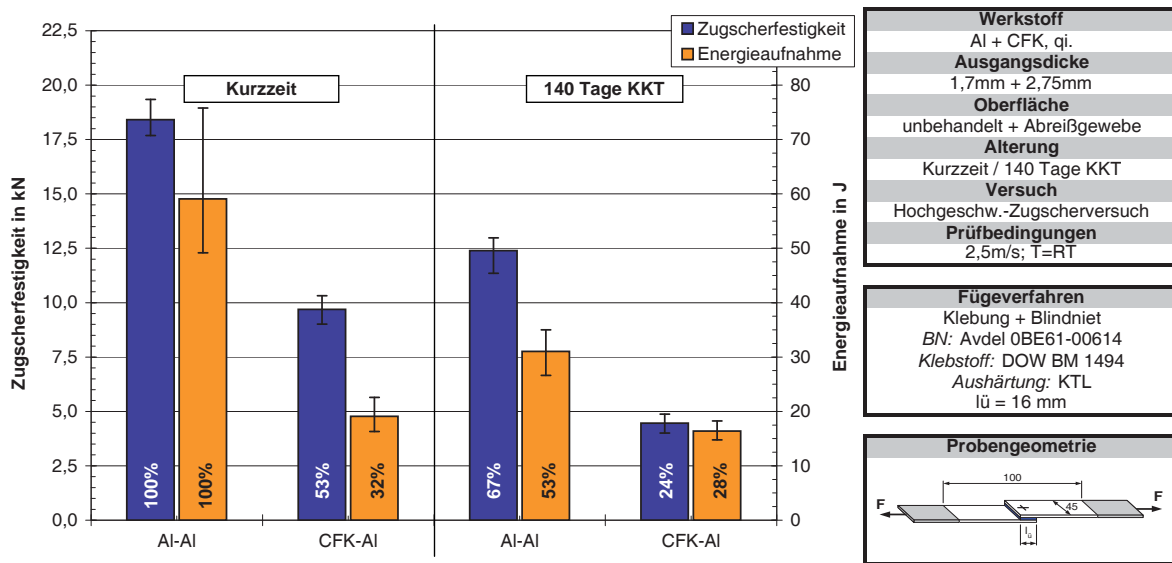


Abb. 5.19: Ergebnisse schlagartiger Zugscherbelastung der Blindnietklebung

Fügung im Karosseriebau

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

Die hohe Dehnrates führt zu einer Verfestigung des Klebstoffs und einer geringeren plastischen Verformung im Aluminium.

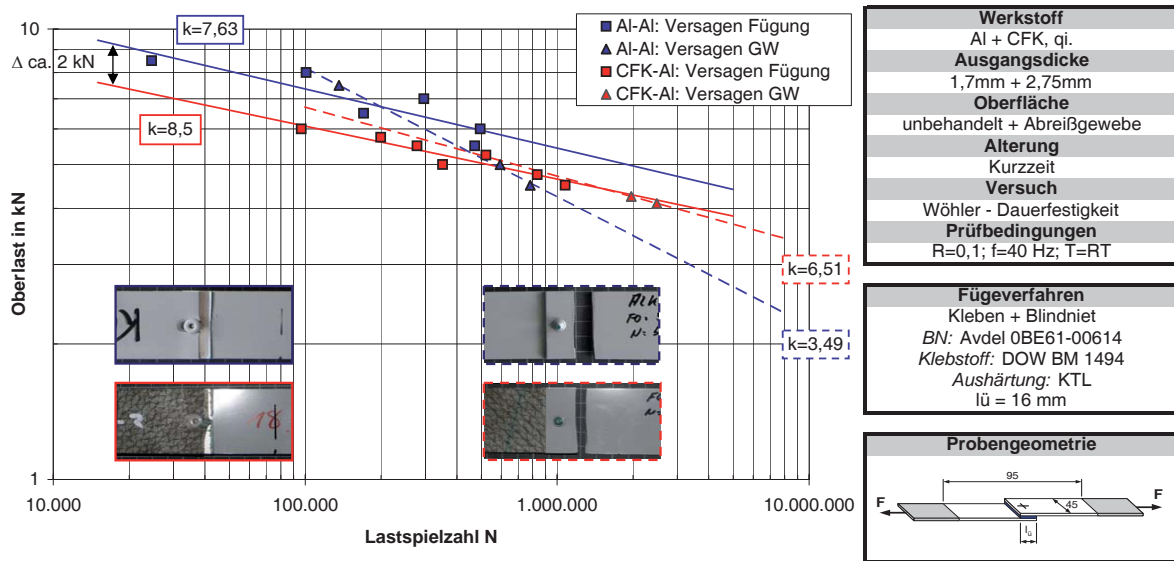
Die Festigkeit der Mischverbindung in den HZV fällt um ca. 28% gegenüber den quasistatischen Versuchen ab. Das spröde Werkstoffverhalten des FKV und die hohe Prüfgeschwindigkeit verhindern das Umlagern von Spannungsspitzen, was zu einem frühzeitigen interlaminaren Versagen im CFK-Werkstoff, ähnlich dem der quasistatischen Versuche, führt. Dies wird durch einen Vergleich der Bruchbilder bestätigt. Die Energieaufnahmen sind nahezu unverändert, da bei den Mischverbindungen die Energieaufnahme im Wesentlichen vom Ausreißen des mechanischen Elements bestimmt wird.

Bei der Auswertung der gealterten Proben sind die Ergebnisse aus den quasistatischen Versuchen tendenziell übertragbar. Die Alterung des crashstabilen Klebstoffs BM 1494 sowie der Epoxidharzmatrix des FKV wirkt sich bei den HZV stärker als bei den quasistatischen Versuchen aus. Der Festigkeitsabfall der Epoxide [Hab06] fällt bei den Versuchen mit hohen Dehnrates stärker ins Gewicht.

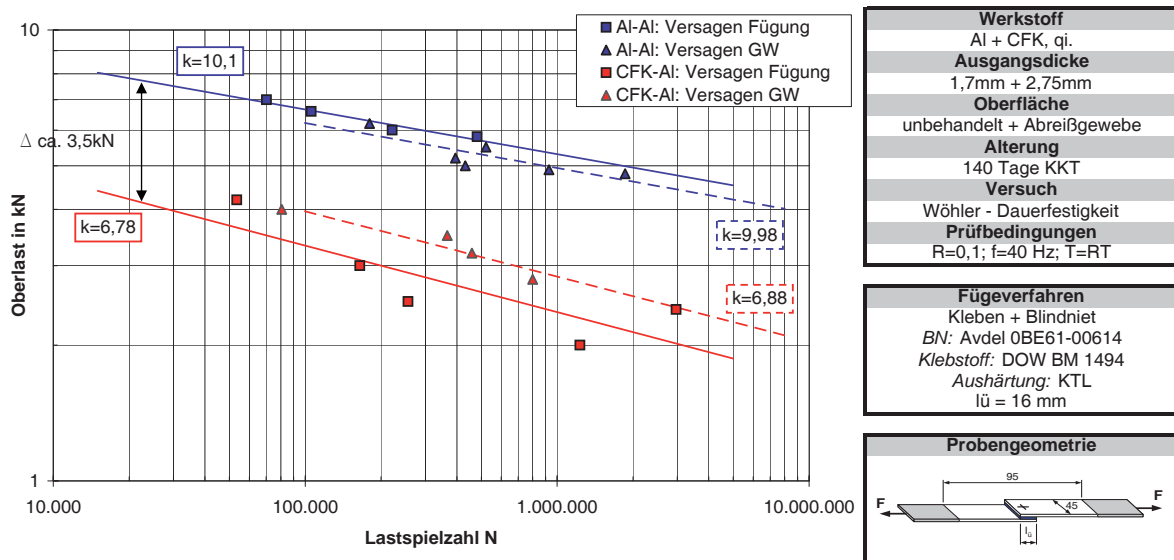
### 5.4.2.3 Versuche mit wechselnder Belastung: BNK,K

Zur Prüfung der Dauerfestigkeit der Fügungen werden dynamische Schwingversuche durchgeführt. Um den Aufwand gering zu halten und eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden einfache Flachzugproben mit der gleichen Geometrie wie bei den quasistatischen Versuchen verwendet. Dabei wird die Probe mit einer Frequenz von  $45 - 48\text{Hz}$  kraftgesteuert belastet. Die Versuchsdurchführung erfolgt schwellend mit einem R-Wert von  $R = 0,1$ . So wird sichergestellt, dass die Probe rein auf Zug belastet wird. Der einzelne Schwingversuch wird bei einer Wegänderung von mehr als 40% oder einer Grenzspielzahl von  $5 \cdot 10^6$  Lastwechseln beendet. Die Messergebnisse werden doppelt logarithmisch in ein Diagramm aufgetragen (Abb. 5.20, S. 107). Zur Erstellung der Wöhlerlinien wird die Versagensart in Abhängigkeit vom Lastniveau und der Schwingenspielzahl berücksichtigt.

Bei den ungealterten Proben sind im höheren Lastbereich die Verbindungsfestigkeiten für die Dauerschwingfestigkeit ausschlaggebend (Abb. 5.20a, S. 107). Hier sind die Wöhlerlinien der Blech- und der Mischverbindungen nahezu parallel, was durch die ähnlichen  $k$ -Faktoren der Wöhlerlinien deutlich wird. Die Blechverbindungen weisen eine ca.  $2kN$  höhere Dauerschwingfestigkeit auf als die Mischverbindungen. Dieser Festigkeitsunterschied von ca.  $2kN$  deckt sich mit den Ergebnissen aus den quasistatischen Versuchen. Bei geringeren Oberlasten und höheren Schwingenspielzahlen ist die Dauerfestigkeit der Verbindung höher als die Dauerfestigkeit des Grundwerkstoffs. Die Bereiche direkt außerhalb der Überlappung sind durch den Steifigkeitssprung und die damit auftretenden Spannungsspitzen besonders hoch belastet, so dass bei Grundwerkstoffversagen der Bruch in diesem Bereich auftritt, wie die Bruchbilder im Diagramm in Abbildung 5.20a (S. 107) zeigen. Bei den Mischverbindungen kommt es immer zu einem Versagen im Al-Fügepartner, da FKV insbesondere gegenüber Aluminium eine überlegene Ermüdungsfestigkeit besitzen [Sch07]. Zusätzlich ist die Zugfestigkeit des CFK-Fügepartners bei der gewählten Materialpaarung höher als die der Al-Fügepartner und



(a) Wöhlerlinien, Kurzzeit



(b) Wöhlerlinien, 140 Tage KKT

Abb. 5.20: Wöhlerlinien der Blindnietklebung

Fügung im Karosseriebau

blau: Al-Al; rot: CFK-Al;

□ Versagen der Fügung; △ Versagen im Grundwerkstoff (GW)

das CFK Laminat weniger beansprucht. Bei niedrigen Lasten wirken sich die relativ schwachen interlaminaren Eigenschaften des CFK nicht negativ aus.

Die  $k$ -Faktoren der Wöhlerlinien der Mischverbindung liegen in beiden Bereichen, d.h. bei Grundwerkstoff- und Verbindungsversagen, über denen der Blechverbindung, vor allem aber im niedrigeren Lastbereich bei hohen Schwingspielzahlen. Hier stützt das CFK das Aluminium durch seine höhere Biegesteifigkeit. Es kommt zu einer geringeren Rotation des Fügebereichs und damit zu einer geringeren Belastung direkt außerhalb der Überlappung. Ein Versagen im Grundwerkstoff tritt bei den Mischverbindungen bei höheren Schwingspielzahlen als bei der Blechverbindung auf.

Der Einfluss der Alterung durch die KKT-Behandlung (Abb. 5.20b, S. 107) bewirkt bei den Blechverbindungen einen niedrigeren, jedoch flacheren Verlauf der Wöhlerlinien im Vergleich zu den ungealterten Proben. Die Festigkeiten der Verbindung nehmen aufgrund von Alterungseffekten vor allem im Epoxidklebstoff ab. Durch die lange Lagerung und die dabei auftretenden Kriecheffekte werden Spannungsspitzen im Klebstoff abgebaut, so dass sich die  $k$ -Faktoren für ein Versagen der Fügung und ein Versagen im Grundwerkstoff auf einem höheren Wert angleichen. Bei den Blechverbindungen ist somit ein moderater Dauerschwingfestigkeitsabfall mit flacherem Wöhlerlinienverlauf festzustellen.

Die Dauerschwingfestigkeit der Mischverbindungen ist im Vergleich zur Blechverbindung durch die Alterung stärker herabgesetzt. Die Bereiche für Versagen der Fügung und Versagen im Grundwerkstoff sind nicht klar voneinander getrennt, so dass kein Bruchverhalten für hohe und niedrigere Schwingspielzahlen zugeordnet werden kann. Dieses ist vor allem auf die Klebschichtunterwanderung, bei deren Ausmaß bereits innerhalb einer Probenserie starke Schwankungen beobachtet werden, zurückzuführen. Die  $k$ -Faktoren für hohe und niedrigere Schwingspielzahlen passen sich ebenfalls wie bei den Blechverbindungen an und liegen im Bereich der ungealterten Mischverbindungen.

### 5.4.3 Versuchsprogramm mit Fügung in der Montage

Wie bereits in Kapitel 3.2.3.1 (S. 59) erwähnt wird eine Blindnietklebung als Fügung in der Montage (BNK,M) als zweites Szenario untersucht. Die im Einzelnen durchgeführten Versuche sind in Tabelle 5.5 (S. 109) aufgeführt.

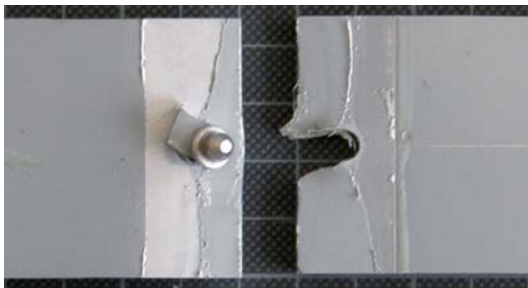
Tab. 5.5: Versuchsmatrix in der Montage kombiniert gefügter Verbindungen

		Belastung	Kurzzeit	140d KKT
DP-460 + Blindniet	Al-AI	quasistatisch	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X
	CFK-AI	quasistatisch	X	X
		quasistatisch; CFK+Glasgewebe	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X
	g.CFK-AI	quasistatisch	X	X
		quasistatisch; CFK+Glasgewebe	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X

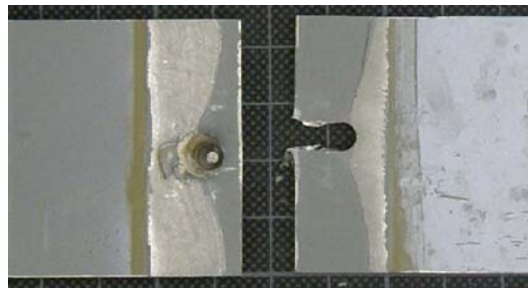
Bei den in der Montage gefügten Proben durchlaufen die für die Vernietung zuvor gebohrten Al-Fügepartner den KT-Lackierprozess. Sie werden somit vor dem Fügen zum Korrosionsschutz mit KTL beschichtet und durch den KTL-Trocknungsofen ausgelagert. Anschließend wird der Al-Fügepartner mit dem CFK-Fügepartner ohne weitere Vorbehandlung auf der Lackschicht verklebt und vernietet. Dabei wird der Klebstoff DP-460 der Firma 3M und der gleiche Edelstahlblindniet wie bei den Versuchen mit Fügung im Karosseriebau verwendet. Die Aushärtung des Klebstoffs findet bei Raumtemperatur statt, so dass die Klebung bei Raumtemperatur, also der Versuchstemperatur, spannungsfrei ist.



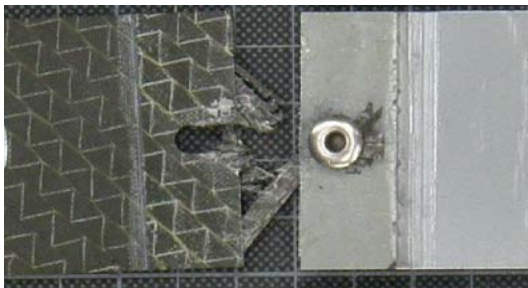
Der CFK-Fügepartner durchläuft bei dieser Variante nicht den KT-Lackierprozess und wird auch nach der Fertigung nicht gesondert behandelt. Vergleichbarkeit mit den Versuchen mit Fügung im Karosseriebau besteht, da die gleiche Materialkombination und Fügegeometrie verwendet wird. Weiter zeigen die im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit durchgeführten Materialversuche des CFK-Grundwerkstoffs, dass die mechanischen Eigenschaften des CFK durch den KTL-Durchlauf nicht bzw. nur unwesentlich verändert werden (Kap. 5.1.2.3, S. 74).



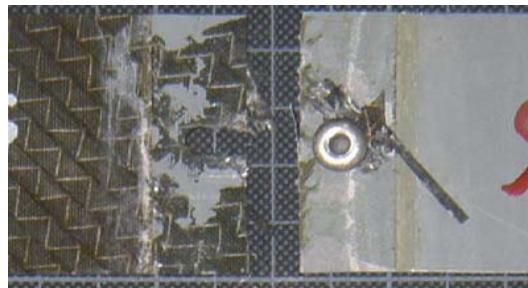
(a) Al-Al: Kurzzeit



(b) Al-Al: 140d KKT



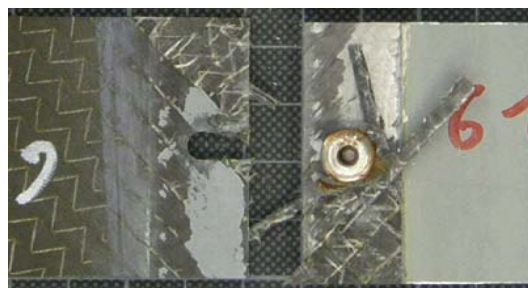
(c) CFK-Al: Kurzzeit



(d) CFK-Al: 140d KKT



(e) g.CFK-Al: Kurzzeit



(f) g.CFK-Al: 140d KKT

Abb. 5.21: Bruchbilder der quasistatischen Versuche; Fügung in der Montage

Bei Vorversuchen zeigt sich, dass die Klebung mit dem kalt härtenden Klebstoff im Gegensatz zum heiß härtenden Epoxidklebstoff auf der Abreißgewebeoberfläche des CFK bei niedrigen Lasten komplett adhäsiv versagt (Abb. 5.21c, S. 110), obwohl nur geringste Rückstände auf der CFK-Oberfläche feststellbar sind (Kap. 5.3.1, S. 84).

Um dem entgegenzuwirken, werden zusätzliche Versuche mit einem vor der Verklebung angeschliffenem CFK-Fügepartner (g.CFK) durchgeführt. Beim Anschleifen wird nur die äußere Harzschicht abgetragen, um eine Verletzung der äußeren CFK-Lage zu vermeiden. Das Anschleifen zur Klebflächenvorbehandlung ist vor allem für größere Stückzahlen nicht praxisrelevant. Es wird hier jedoch verwendet, um eine Vergleichbarkeit mit den im Karosseriebau gefügten Versuchen zu erreichen. Hier müssen für einen Serieneinsatz im Automobilbau alternative Klebstoff- und Harzsysteme oder praxistaugliche Vorbehandlungsmethoden gefunden werden, um eine bessere Anbindung der Fügepartner zu erreichen.

#### 5.4.3.1 Quasistatische Versuche: BNK,M

Die Verwendung des Klebstoffs DP-460 wirkt sich positiv auf die Qualität der Klebung aus. Da dieser Klebstoff nicht für die KTL auswaschbeständig sein muss, besitzt er eine niedrigere Viskosität als der pastöse BM 1494. So wird eine dünnere und gleichmäßigere Klebschichtverteilung zwischen den Blindnietelementen erreicht. Durch die Aushärtung bei Raumtemperatur werden keine Spannungen in der Klebung eingefroren. Diese Phänomene wirken sich positiv auf die Festigkeiten der Klebung aus. Die Verbindungsfestigkeiten werden jedoch durch die KTL-Festigkeiten beschränkt.

Bei der Blechverbindung liegen die erreichbaren Festigkeiten (Abb. 5.22, S. 112) unter denen beim Fügen im Karosseriebau und unter der Fließgrenze des Al-Fügepartners. Wie das Bruchbild in Abbildung 5.21a (S. 110) zeigt, kommt es zu einem Versagen in der KTL. Für eine Verklebung in der Montage sind die Lackfestigkeiten somit dimensionierend. Die erreichbaren Festigkeiten der Mischverbindung liegen in diesem Fall

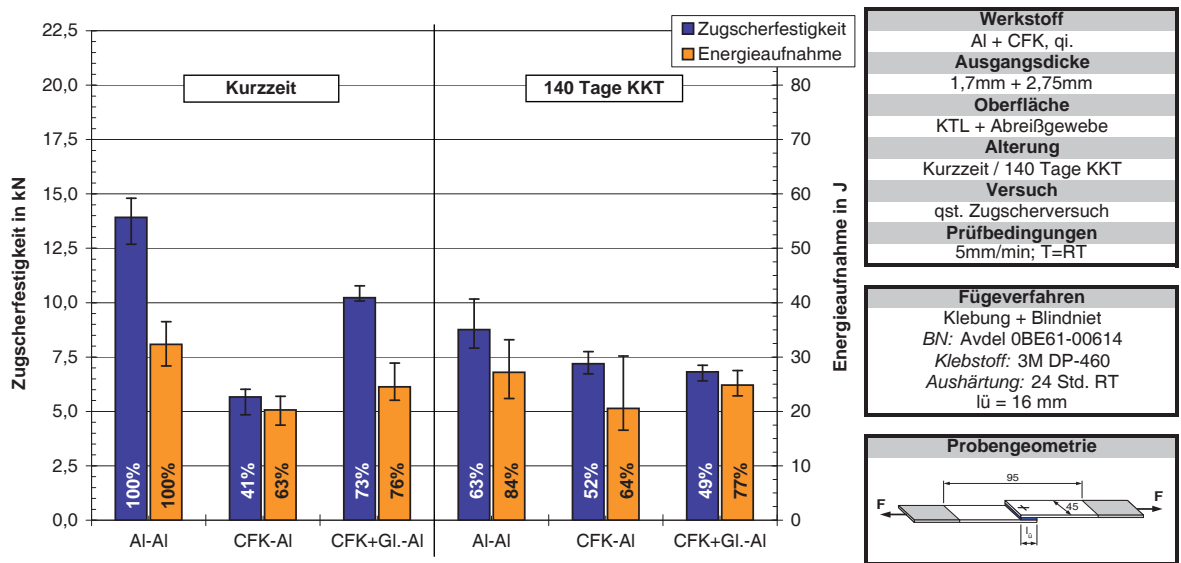


Abb. 5.22: Ergebnisse quasistatischer Zugscherversuche der Blindnietklebung

Fügung in der Montage

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

weit unter denen der Blechverbindung, was auf die schlechte adhäsive Anbindung des Klebstoffs zurückzuführen ist. Ohne eine Vorbehandlung der Klebfläche werden folglich keine hohen Festigkeiten bei den Mischverbindungen erreicht. Auch hier wird die Energieaufnahme überwiegend durch das sekundäre Tragverhalten bestimmt.

Die Proben, deren CFK-Fügepartner mit einem Glasgewebe gefertigt sind, ertragen höhere Lasten. Dieses Phänomen ist auf eine Verlagerung der Spannungsspitzen von der Klebstoffgrenzschicht am CFK in die Klebschicht und die KTL zurückzuführen. Durch das weniger steife Gewebe und die homogenere Grenzfläche am CFK reichen die schwachen adhäsiven Kräfte des Klebstoffs aus, um ein Versagen in der KTL mit gleichzeitigem interlaminarem Versagen im CFK zu verursachen, wie es aus den Versuchen mit Fügung im Karosseriebau bekannt ist. Dieser Effekt geht jedoch durch Alterung verloren, so dass hier beide Mischverbindungen auf einem ähnlichen Niveau liegen. Wie bei den Blechverbindungen versagt die Klebung auf dem Glasgewebe im KT-Lack.

Im Gegensatz dazu liegt die Festigkeit der Versuche mit dem angeschliffenen CFK-Fügepartner im Bereich der Werte der Al-Al-Verbindungen (Abb. 5.23, S. 113). Obwohl die angeschliffene Mischverbindung und die Blechverbindung beide im KT-Lack versagen (Abb. 5.21a und 5.21e, S. 110), liegen die Festigkeiten mit dem angeschliffenen CFK-Fügepartner ohne Glasgewebe über denen der Blechverbindung. Hier wird eine plastische Verformung im Al-Fügepartner erreicht (Abb. 5.24, S. 114). Dieser Festigkeitsanstieg ist mit der höheren Biegesteifigkeit des FKV-Fügepartners zu erklären. Dadurch wird bei den Mischverbindungen im Vergleich zu den Blechverbindungen die Rotation des Fügebereichs behindert, so dass Schälspannungsspitzen an den Überlappungsenden in Schubspannungen umgelagert werden. Diese Spannungsumlagerung findet ebenfalls bei den mit Glasgewebe verstärkten Proben statt. Sie kommt jedoch nicht zum tragen, da es ähnlich den Versuchen mit Fügung im Karosseriebau zu einem frühzeitigen Versagen im Glasgewebe kommt. Dieses wird belegt durch die nahezu identischen Festigkeiten der Versuche bei Fügung in der Montage und Fügung im Karosseriebau (vgl. Abb. 5.16, S. 101 und Abb. 5.23, S. 113).

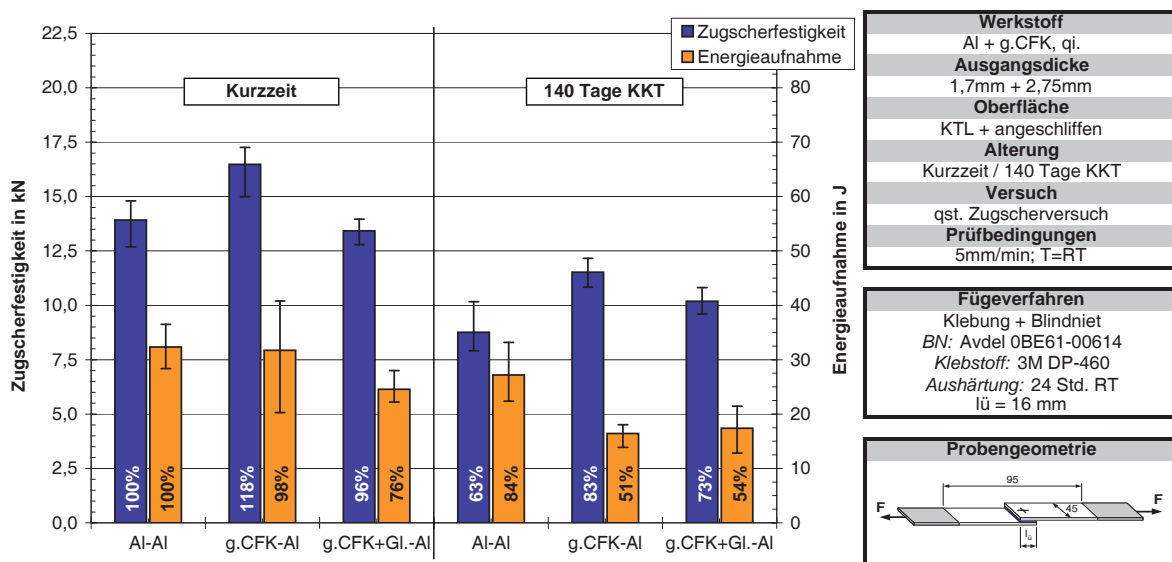


Abb. 5.23: Ergebnisse quasistatischer Zugscherversuche der Blindnietklebung  
 Fügung in der Montage, CFK angeschliffen (g.CFK)  
**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

Weiter wird die Energieaufnahme der Mischverbindung durch das geänderte Versagen positiv beeinflusst. Durch das adhäsive Versagen auf der CFK-Oberfläche und dem KTL-Abriss wird das CFK-Laminat nicht wie bei den Fügungen im Karosseriebau beim Versagen der Klebung interlaminar vorgeschädigt. Es kommt zu einem ausgebildeten Tragverhalten des Blindnietes im sekundären Lastniveau (Abb. 5.24, S. 114). In Kombination mit dem plastischen Fließen des primären Lastniveaus werden so deutlich höhere Energieaufnahmen als bei der Fügung im Karosseriebau erreicht.

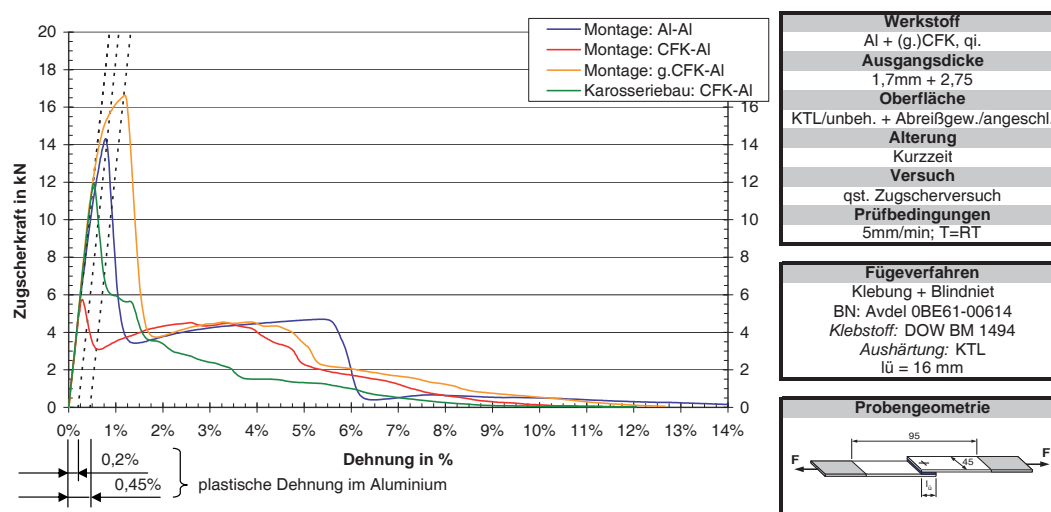


Abb. 5.24: Kraft-Dehnungsverläufe einer in der Montage Proben im Vergleich zur im Karosseriebau gefügten Mischverbindung: Blindnietklebung

Nach 140 Tagen KKT-Alterung besitzt die Blechverbindung noch 63% ihrer Ursprungsfestigkeit (Abb. 5.22, S. 112). Da die Bruchbilder der gealterten und ungealterten Proben nahezu identisch sind (Abb. 5.21, S. 110), ist der Festigkeitsabfall nur mit einer Alterung der Lackschicht zu begründen. Durch die Zeit in der Alterung scheint es bei den Mischverbindungen zu einer besseren Anbindung der Klebschicht an die Abreißoberfläche des CFK-Fügepartners zu kommen, da hier höhere Festigkeiten im Vergleich zu den nicht gealterten Proben erreicht werden. Die verbesserte adhäsive Anbindung ist ebenfalls im Bruchbild erkennbar. Statt eines totalen adhäsiven Versagens ist ein teilweiser KTL-Abriss zu beobachten. Durch den identischen Versagensmodus sind Festigkeiten

der Blech- und Mischverbindungen nach einer Alterung von 140 Tagen KKT auf einem ähnlichen Niveau. Eine Unterwanderung der Klebschicht wie bei den im Karosseriebau gefügten Mischverbindungen kann nicht festgestellt werden. Die den Al-Fügepartner umschließende Lackschicht sorgt für einen ausreichenden Schutz vor Kontaktkorrosion.

### 5.4.3.2 Hochgeschwindigkeitszugscherversuche: BNK,M

Die bei den quasistatisch untersuchten Proben beobachteten Effekte sind im allgemeinen auf die Hochgeschwindigkeitszugscherversuche übertragbar. Bei den Blechverbindungen versagen die Verbindungen im primären Lastniveau durch einen Abriss der KTL und im sekundären Lastniveau durch ein Ausscheren des Blindnietes. Trotz großer Streuung liegen die Mittelwerte der Zugscherfestigkeit und der Energieaufnahme sowohl vor als wie auch nach Alterung im Bereich der quasistatischen Ergebnisse (Abb. 5.25, S. 115).

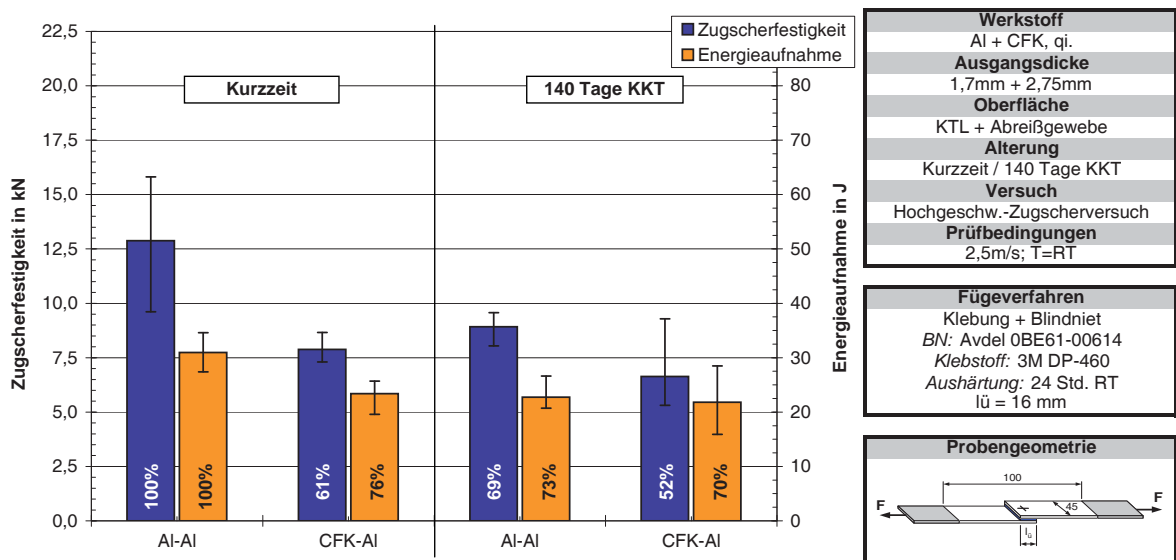


Abb. 5.25: Ergebnisse schlagartiger Zugscherbelastung der Blindnietklebung  
Fügung in der Montage

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

Bei den Mischverbindungen ist auffällig, dass die schlechte adhäsive Anbindung keinen so großen Einfluss auf die Zugscherfestigkeiten hat wie bei den quasistatischen Versuchen. Die Alterungseinflüsse sind jedoch ebenfalls deutlich erkennbar. Die Zugscherfestigkeit der angeschliffenen Fügung liegt um 11% über derer der auf der Abreißoberfläche verklebten Proben (Abb. 5.26, S. 116). Beim Versagen der Klebung kommt es im Gegensatz zu den direkt verklebten Proben zu einem gemischten Versagen der KTL und des CFK-Laminats, ähnlich den Versuchen mit Fügung im Karosseriebau. Aufgrund der hohen Prüfgeschwindigkeit bildet sich weder bei den direkt verklebten noch bei den angeschliffenen Proben ein ausgeprägtes sekundäres Lastniveau aus. Der Blindniet versagt durch Lochleibung im CFK und reißt mit abfallender Last aus dem CFK-Laminat aus.

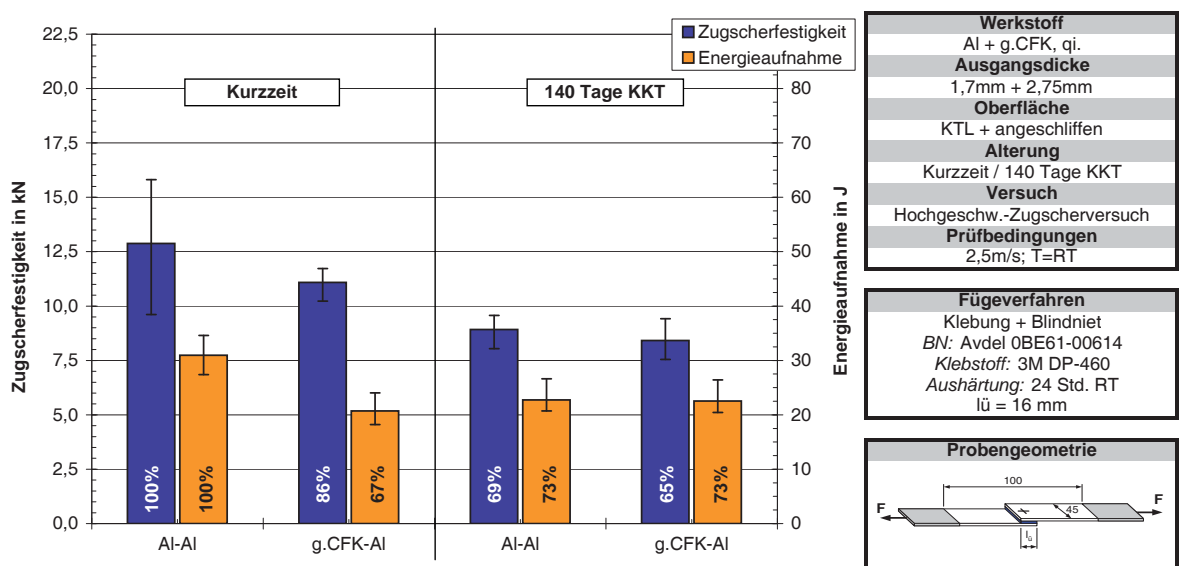


Abb. 5.26: Ergebnisse schlagartiger Zugscherversuche der Blindnietklebung  
 Fügung in der Montage, CFK angeschliffen (g.CFK)  
**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

Die Energieaufnahmen der Mischverbindungen sind bei schlagartiger Belastung mit denen der im Karosseriebau gefügten Proben vergleichbar. Da es zu keiner plastischen Deformation im Aluminium kommt, wird der Hauptteil der Energieaufnahme durch

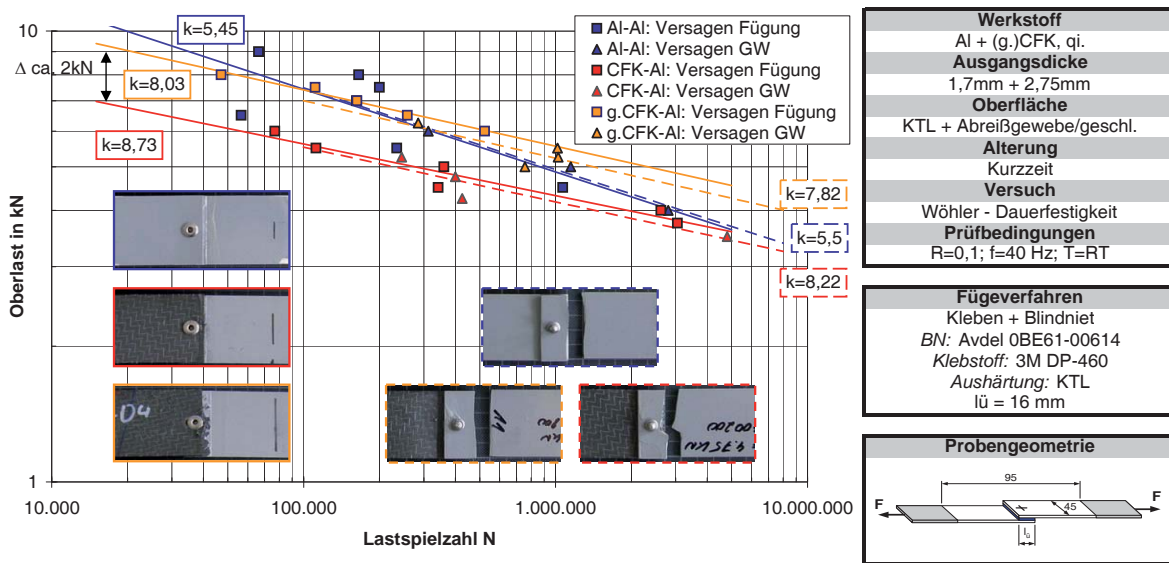
das sekundäre Lastniveau, also das Ausreißen des Niets aus dem CFK, bestimmt. Die Vorschädigung durch den Faserabriss und durch die auftretenden Delaminationen führen bei den angeschliffenen Proben zu einer Schwächung des Laminats und somit zu geringeren Energieaufnahmen beim Ausreißen des Blindniets.

#### 5.4.3.3 Versuche mit wechselnder Belastung: BNK,M

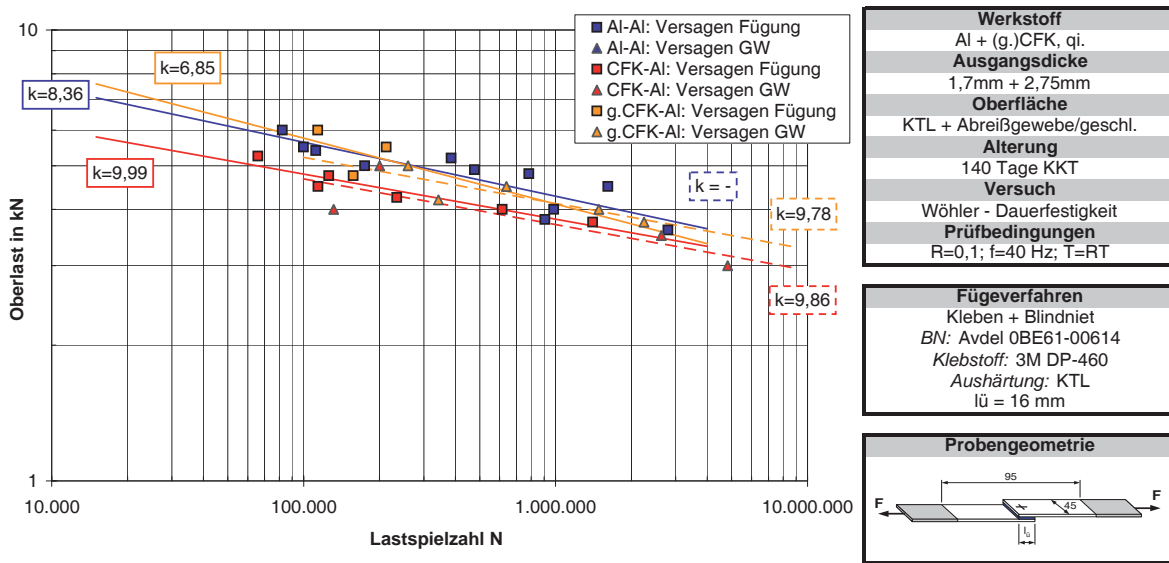
Die Dauerfestigkeiten der Versuche mit Fügung in der Montage zeigen, dass die im Fügebereich angeschliffene Mischverbindung im hohen Oberlastbereich bei niedrigen Schwingspielzahlen eine ähnliche Dauerfestigkeit wie die Blechverbindung besitzt (Abb. 5.27a, S. 118). Die Wöhlerlinie der Mischverbindung mit Verklebung auf der Abreißoberfläche ist in diesem Schwingspielzahlbereich um ca.  $2kN$  nach unten versetzt. Aufgrund der geringen Probenanzahl und der Streuung sind die  $k$ -Faktoren beider Mischverbindungsvarianten als identisch zu betrachten und liegen im Bereich der  $k$ -Faktoren der im Karosseriebau gefügten Proben. Im Gegensatz dazu verlaufen die Wöhlerlinien der Blechverbindung steiler und nähern sich im hohen Schwingspielzahlbereich den Wöhlerlinien der Versuche mit Klebung auf der Abreißoberfläche an. Hier ist wieder der stützende Effekt der Fügestelle durch die höheren Biegesteifigkeiten des CFK-Laminats erkennbar. Dabei liegen die  $k$ -Faktoren der Blechverbindung zwischen den  $k$ -Faktoren für das Versagen der Fügung und dem Werkstoffversagen der Karosseriebaufügung.

Bei allen drei Versuchsserien mit Fügung in der Montage ist der Übergang zwischen dem Versagen in der Fügung und dem Grundwerkstoffversagen nicht eindeutig identifizierbar sondern fließend. Er befindet sich aber tendenziell bei eher niedrigeren Schwingspielzahlen als bei der Karosseriebaufügung. Dieses Verhalten ist ebenfalls bei den gealterten Schwingversuchen auf einem niedrigeren Lastniveau festzustellen (Abb. 5.27b, S. 118). Hier liegen alle Versuchsserien nahe beieinander mit ähnlichen  $k$ -Faktoren wie bei den ungealterten Proben, da das Versagen der Klebung vor allem durch die KTL-Festigkeiten dominiert wird.





(a) Wöhlerlinien, Kurzzeit



(b) Wöhlerlinien, 140 Tage KKT

Abb. 5.27: Wöhlerlinien der Blindnietklebung

Fügung in der Montage

blau: Al-Al; rot: CFK-Al; orange: g.CFK-Al

□ Versagen der Fügung; △ Versagen im Grundwerkstoff (GW)

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Dauerfestigkeiten der KTL und des Aluminiums im gleichen Bereich liegen. Es werden ähnliche Dauerfestigkeiten wie bei einer Fügung im Karosseriebau erreicht.

#### 5.4.4 Beurteilung der Ergebnisse

Durch die Grundlagenuntersuchungen konnte eine Faser-Harz-Kombination ermittelt werden, die für den Einsatz im Karosseriebau geeignet ist und somit eine Integration und Fügung der Bauteile zu diesem Fertigungszeitpunkt ermöglicht. Im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit wurde der Nachweis erbracht, dass die in der Fertigung nachfolgenden Prozesse keinen negativen Einfluss auf die Materialien haben.

Im nächsten Schritt werden verschiedene im Automobilbau gebräuchliche Fügeverfahren getestet. Das Tragverhalten kombiniert gefügter Proben lässt sich in guter Näherung durch eine Überlagerung der elementaren Fügungen darstellen. Dabei kann, wie in Kapitel 5.2.1 (S. 77) beschrieben, ein primäres und ein sekundäres Tragverhalten identifiziert werden. Das primäre Tragverhalten bis zum Versagen der Klebung wird durch die Klebschicht und ihre Anbindung dominiert. Das sekundäre Tragverhalten ist bei ausreichender Festigkeit des mechanischen Fügeelements nahezu unabhängig von der Wahl des Elements. Hier wurden für eine Fügung im Karosseriebau eine Blindnietklebung und eine FDS-Klebung ohne Vorloch für das detaillierte Versuchsprogramm zur Prüfung der wesentlichen Einflussfaktoren gewählt. Für die Fügung in der Montage wurde die Blindnietklebung identifiziert.

Es wurde die sogenannte  $\Delta\alpha$ -Problematik diskutiert und hier für einfache Geometrien ein überschlägiger Ansatz mit Hilfe der klassischen Laminattheorie und dem vierten Eulerschen Knickfall vorgestellt (vgl. Kap 5.2.1, S. 77). Für genauere Betrachtungen bei komplexeren Geometrien ist ein Ansatz mit Hilfe der FEM empfehlenswert. Das Problem eingefrorener Spannungen bzw. eines Verzugs aufgrund unterschiedlicher Wärmedehnungen der Fügepartner muss von konstruktiver Seite aus angegangen werden.

Um in dem weiterführenden Versuchsprogramm die unterschiedlichen Einflüsse sinnvoll prüfen zu können, wurde die Walzrichtung des Aluminiumblechs senkrecht zur Prüfrichtung geändert sowie der Stahlblindniet durch einen Blindniet mit höherer Festigkeit aus Edelstahl ersetzt. So wird ein Versagen des Verbindungselements ausgeschlossen und ein Versagen der Fügepartner sichergestellt, um so die speziell für diese Materialkombination (CFK-Al) typischen Effekte beobachten zu können. Es ist besonders wichtig, bei der Betrachtung der Energieaufnahme die plastische Verformung des Aluminiums zu berücksichtigen, da diese bei den Blechverbindungen im Gegensatz zu den Mischverbindungen für einen großen Teil der Energieaufnahme verantwortlich ist.

Bei dem Versuchsprogramm mit Fügung im Karosseriebau konnten die Unterschiede zwischen der Blech- und der Mischverbindung unter den verschiedenen Einflussfaktoren aufgezeigt und erklärt werden. Bei der Untersuchung der Blindniet- und der FDS-Klebung wurde die weitgehende Unabhängigkeit des sekundären Lastniveaus von der Art des mechanischen Elements bestätigt. Die Festigkeiten und Energieaufnahmen der Mischverbindung liegen bei allen Versuchen unterhalb denen der Blechverbindung (Tab. 5.6, S. 121), was vor allem auf das Versagen durch Delaminationen im CFK-Grundwerkstoff zurückzuführen ist.

Bei den gealterten Mischverbindungen mit Fügung im Karosseriebau wird aufgrund des Spannungspotentials zwischen der Kohlenstofffaser und dem Aluminium eine totale Unterwanderung der Klebschicht beobachtet, was zu stark verminderter Festigkeit der Klebung führt. Die isolierenden Schichten des Glasgewebes sowie des KT-Lacks bieten keinen ausreichenden Schutz vor Alterungseffekten, so dass diese Verbindungen nicht ohne einen zusätzlichen Korrosionsschutz im Nassbereich eingesetzt werden können.

Im Versuchsprogramm mit Fügung in der Montage wurde ein schlechtes adhäsives Anbinden des kalthärtenden Klebstoffs auf der CFK-Oberfläche beobachtet. Diese Versuche wurden durch Versuche mit angeschliffenen CFK-Fügepartnern ergänzt. Im Vergleich zur Fügung im Karosseriebau werden hier die Festigkeiten der Klebung sowohl

bei den Blech- als auch bei den Mischverbindungen durch die KTL-Festigkeiten begrenzt.

Die Energieaufnahmen der Mischverbindungen bei Fügung in der Montage und im Karosseriebau werden primär durch das mechanische Fügeelement im sekundären Lastniveau bestimmt und liegen dadurch in einem vergleichbaren Bereich. Tendenziell besitzen die Montagefügungen leicht höhere Energieaufnahmen, da durch den vorzeitigen KTL-Abriss eine Vorschädigung im CFK-Laminat verhindert wird und somit das mechanische Element mehr Tragkraft entwickeln kann. Bei den auf KTL gefügten Proben ist keine Unterwanderung der Klebschicht nach den 140 KKT feststellbar. Für den Korrosionsschutz ist die den Al-Fügepartner umschließende KTL ausreichend. Es wird jedoch ein Festigkeitsabfall der Lackschicht von ca. 37% im quasistatischen Fall der Blechverbindung nach den 140 Tagen KKT verzeichnet.

Tab. 5.6: Prozentualer Vergleich der Festigkeiten und der Energieaufnahmen der Blech- und der Mischverbindung referenziert auf die jeweilige ungealterte Blechverbindung ( $\hat{=}$  100%); Fügung in der Montage und im Karosseriebau

			Festigkeit		Energieaufnahme	
			Kurzzeit	KKT	Kurzzeit	KKT
<b>Karosseriebau</b>	<b>qst</b>	Al-Al	100%	88%	100%	38%
		CFK-Al	68%	35%	22%	25%
	<b>HZV</b>	Al-Al	100%	67%	100%	53%
		CFK-Al	53%	24%	32%	28%
<b>Montage</b>	<b>qst</b>	Al-Al	100%	63%	100%	84%
		CFK-Al	41%	63%	52%	64%
		g.CFK-Al	118%	83%	98%	51%
	<b>HZV</b>	Al-Al	100%	69%	100%	73%
		CFK-Al	61%	52%	76%	70%
		g.CFK-Al	86%	65%	67%	73%

Die Festigkeiten der Blechverbindung mit Fügung im Karosseriebau werden von keiner anderen getesteten Verbindungskonfiguration, d.h. weder von den Mischverbindungen mit Fügung im Karosseriebau, noch von den Blech- und Mischverbindungen mit Fügung in der Montage, erreicht (Tab. 5.6, S. 121).

Somit konnten alle drei Bereiche der Untersuchung auf Fügbarkeit (Werkstoff, Fertigung und Konstruktion; vgl. Kap. 2.1, S. 35) abgedeckt werden. Es wurde ein FKV-Werkstoff identifiziert, der sich für einen Einsatz im Karosseriebau eignet. Der zweite Punkt in der Untersuchung auf Fügbarkeit, die Möglichkeit zur Fügung in der Fertigung, ist gegeben, da bereits eingesetzte Fügeverfahren verwendet wurden. Zusätzliche Schritte, die den aktuellen Fertigungsablauf wesentlich verändern, sind nicht nötig. Die Konstruktion, die sogenannte Sicherheit der Fügung, kann im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit nicht abschließend bewertet werden. Hier muss der Konstrukteur im Einzelfall entscheiden, ob die erreichbaren Festigkeiten den Anforderungen genügen.

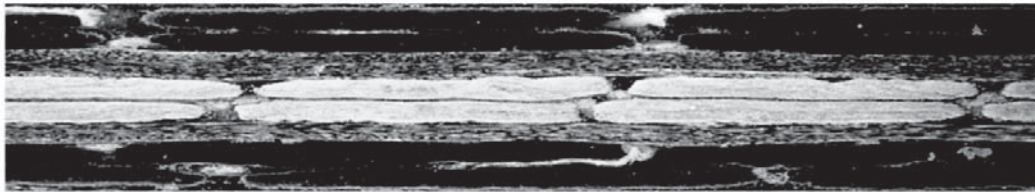
Bei den in Kapitel 3.2.1 (S. 53) identifizierten Bauteilen, die sich für einen strukturellen Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen eignen, ist aufgrund ihrer Position im Fahrzeug eine Integration und damit eine Fügung im Karosseriebau sinnvoll (vgl. Kap. 3.2.3, S. 57). Beim Fügen in der Montage liegen die erreichbaren Festigkeiten sowohl der Blech- als auch der Mischverbindung bereits im Bereich der Festigkeiten der KTL. Da die Festigkeit der Klebung in der Montage durch die Tragfähigkeit der KTL beschränkt ist, bietet eine Fügung im Karosseriebau in Bezug auf Festigkeit und Energieaufnahme wesentlich mehr Potential. Das Tragverhalten des mechanischen Elements wird durch den Fügezeitpunkt nicht beeinflusst. Die hohe Automatisierung im Karosseriebau spricht ebenfalls für eine Integration strukturell tragender Bauteile zu diesem Fertigungszeitpunkt. Aus diesen Gründen werden Optimierungsmaßnahmen für eine Fügung im Karosseriebau benötigt, die es den Mischverbindungen ermöglichen, ähnliche oder bessere Festigkeiten und Energieaufnahmen vergleichbarer Blechverbindungen zu erreichen.

## 6 Optimierungsmaßnahmen

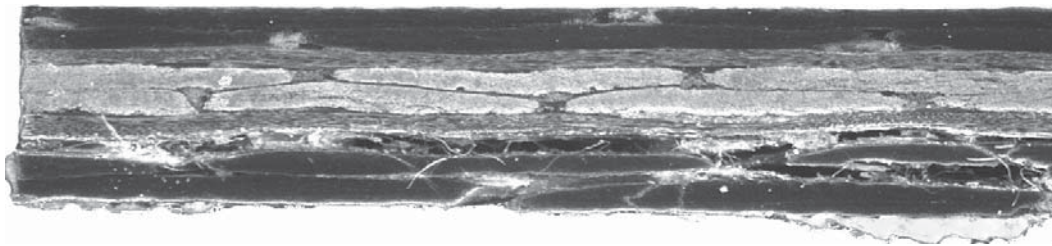
Weder die mit den Randbedingungen der Montage noch die mit den Randbedingungen des Karosseriebaus gefügten Mischverbindungen erreichen die Festigkeiten und Energieaufnahmen der reinen Blechverbindung. Ziel ist daher die Optimierung der Verbindungsstelle hinsichtlich Zugscherfestigkeit und Energieaufnahme. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Aspekte des primären und des sekundären Tragverhaltens betrachtet (vgl. Kap. 2.3, S. 42 - Abb. 2.3, S. 44).

Die Versuche mit unterschiedlichen Fügeverfahren (Kap. 5.3, S. 82) und das weiterführende Versuchsprogramm (Kap. 5.4, S. 91) zeigen, dass die maximale Festigkeit vor allem vom primären Tragverhalten, d.h. dem Tragverhalten der Klebung, abhängt. Die verwendeten Klebstoffe besitzen eine ausreichende Festigkeit. Doch bei allen Verbindungen mit guter Klebschichtanbindung kommt es zum Materialversagen im CFK-Fügepartner. Die Bruchbilder (Abb. 5.18c und 5.18e, S. 103) zeigen eine Mischung aus Abriss der äußeren Harzschicht vom FKV und Delamination der unteren CFK-Lagen mit anschließendem Abriss dieser Lagen vom CFK-Verbund. Diese Delaminationen werden durch die hohen Schälspannungen, hervorgerufen durch die exzentrische Belastung der einschnittigen Verbindung, verursacht. Schliffbilder zeigen, dass nach Versagen der Klebung Delaminationen nicht nur zwischen den äußeren sondern auch zwischen weiter innen liegenden Laminatlagen zu beobachten sind (Abb. 6.1, S. 124).

Da alle Mischverbindungen einen sehr geringen plastischen Anteil im primären Tragverhalten besitzen, wird die Energieaufnahme überwiegend vom sekundären Tragverhalten



(a) ungeschädigtes Laminat



(b) Schliffbild des Laminats im Fugebereich nach Versagen der Klebung

Abb. 6.1: Schliffbild im Fugebereich des CFK-Laminats vor und nach Versagen der Klebung; Schliffbildebene: Probenmitte und  $\parallel$  zur Zugrichtung  
Fügung im Karosseriebau

bestimmt. Höhere Verbindungsfestigkeiten und eine damit verbundene plastische Verformung des Al-Fügepartners würden die Energieaufnahme der Verbindung erheblich verbessern. Im sekundären Lastniveau weisen die Proben wesentlich höhere Dehnungsanteile im Vergleich zum primären Lastniveau bis zum Versagen der Klebung auf. Alle Mischverbindungen versagen im sekundären Lastniveau durch Lochleibung des mechanischen Elements im CFK auf einem Lastniveau unterhalb dem der Blechverbindungen. Dieses Versagen zeichnet sich vor allem durch lokale Delaminationen und ein Ausknicken der Fasern am Lochrand aus. Durch die bis zum Versagen der Klebung verursachten Delaminationen und das partielle Abreißen der unteren CFK-Lagen ist das Laminat vorgeschädigt. Somit liegt das Lastniveau im sekundären Tragverhalten unter dem einer mit einem mechanischen Element elementar gefügten Verbindung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das primäre Tragverhalten, also die Festigkeit der Klebung, ausschlaggebend für die Maximallast ist. Das sekundäre Tragver-

halten, also das Tragverhalten des mechanischen Elements, ist dimensionierend für die Energieaufnahme. Es ist sinnvoll, Maßnahmen zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften zu identifizieren und zu untersuchen, die auf beide Bereiche des Tragverhaltens Einfluss haben. Um das Tragverhalten der Klebung bzw. des mechanischen Elements zu verbessern, stehen folgende praktikable Maßnahmen zur Verfügung:

1. Oberflächenvorbehandlung des FKV vor der Verklebung
2. Wechsel des Harzsystems
3. Vergrößerung der Überlappungslänge
4. Veränderung der Fügegeometrie (vgl. Abb. 3.3, S. 49)
5. Verbesserung der Lochleibungseigenschaften
6. Verwendung von 3D-Faserhalbzeugen
7. 3D- bzw. Z-Verstärkung des FKV

Dabei stehen Maßnahmen zur Erhöhung der interlaminaren Festigkeiten im Fokus, da diese sowohl zu einer Verbesserung der primären wie der sekundären Trageigenschaften führen.

## 6.1 Allgemeine Diskussion möglicher Maßnahmen

**ad 1:** Eine Klebflächenvorbehandlung des FKV durch Anschleifen (z.B. von BMW angewandt) oder Skelettieren der Fasern mittels Laser [GG06] kann zur Erhöhung der Festigkeiten führen. Die Fasern werden dabei direkt an den Klebstoff angebunden. So wird ein Versagen der Grenzschicht an der Außenseite des Laminats ausgeschlossen. Eine Delamination der inneren Lagen wird hierdurch nicht verhindert. Diese Verfahren sind im Vergleich zum Abziehen des Abreißgewebes wesentlich aufwändiger.



**ad 2:** Bei einem Wechsel des Harzsystems ist keine Verbesserung zu erwarten. Das hier verwendete Harzsystem ist bereits ein System im oberen Festigkeitsbereich. Zudem ist das Harz schlagzäh modifiziert, so dass eine wesentliche Erhöhung der interlaminaren Festigkeiten und der Festigkeiten der äußeren Harzschicht durch eine Modifikation oder durch einen Wechsel des Harzsystems kaum zu erreichen ist.

**ad 3:** Bei einer Vergrößerung der Überlappungslänge ist eine Verbesserung der Zugscherfestigkeit nicht zu erwarten, da für eine Zugscherbelastung die verwendete Überlappungslänge mit  $16\text{mm}$  bereits im Bereich der optimalen Überlappungslänge liegt. Die optimale Überlappungslänge  $l_{\ddot{u}opt}$  für das schwächere Fügmaterial wird nach der Formel 6.1 berechnet [Hab06] und beträgt ca.  $15$  bzw.  $17\text{mm}$ .

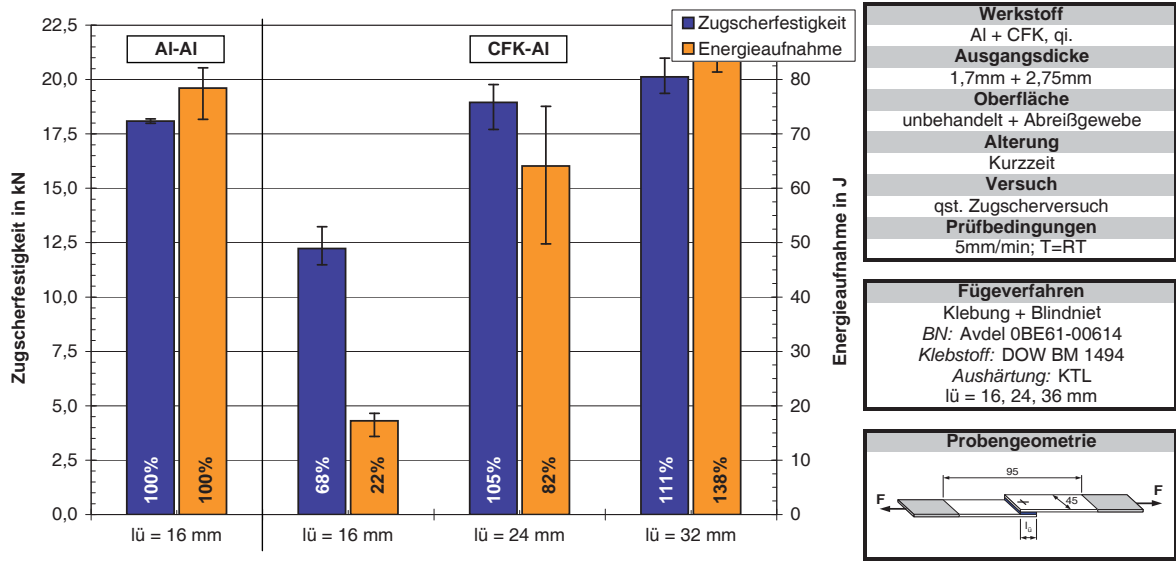
$$l_{\ddot{u}opt} = \frac{R_{p0,2Al} \cdot t_{Al}}{\tau_{BM1494}} \quad \text{bzw.} \quad l_{\ddot{u}opt} = \frac{R_{mAl} \cdot t_{Al}}{\tau_{BM1494}} \quad (6.1)$$

Dennoch führt eine vergrößerte Überlappungslänge in den Versuchen zu einer Erhöhung der Zugscherfestigkeiten und der Energieaufnahmen sowohl bei quasistatischer wie auch bei schlagartiger Zugscherbelastung (Abb. 6.2, S. 127).

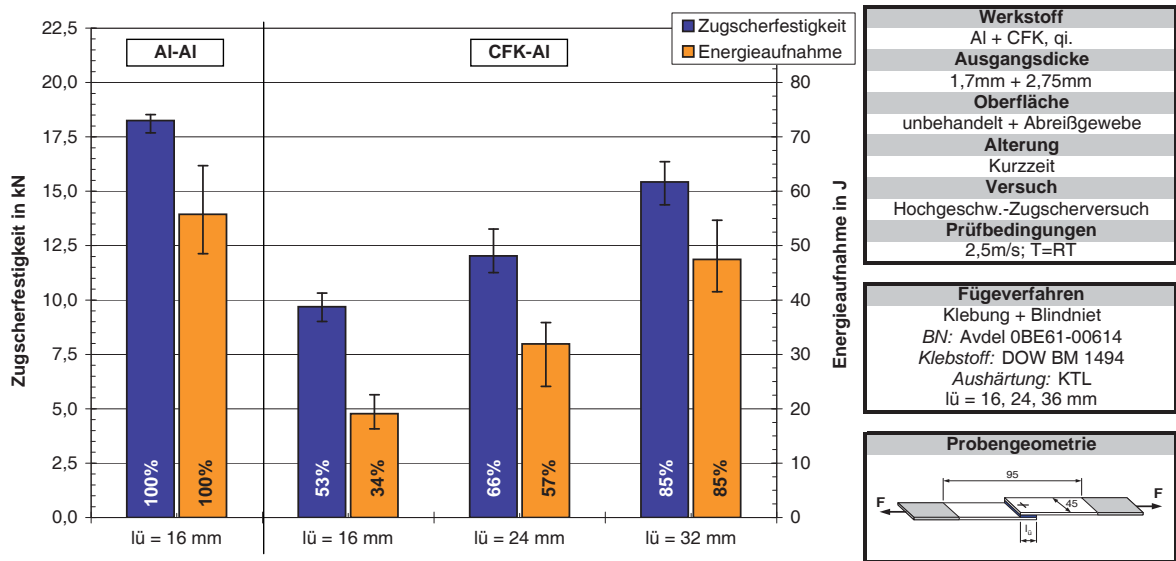
Die beobachtete Festigkeitserhöhung des primären Lastniveaus ist mit der größeren Überlappungslänge bei gleichbleibender freier Prüflänge erklärbar. Die Fügepartner stützen sich gegenseitig und es kommt bei größeren Überlappungslängen zu geringeren Schälkräften im Überlappungsbereich. Dieser Effekt wird von den Formeln 6.1 nicht berücksichtigt.

Die Verbesserung der Energieaufnahme wird neben dem höheren primären Tragverhalten vor allem durch eine Verlängerung des sekundären Lastniveaus, also eine Verlängerung des Lochleibungsweges für das mechanische Element verursacht.

Die erreichten Festigkeiten und Energieaufnahmen der Mischverbindung erreichen bzw. übertreffen im quasistatischen Fall sogar die der Blechverbindung mit einer Überlappungslänge von  $l_{\ddot{u}} = 16\text{mm}$ . Diese Verbesserungsmaßnahme wird jedoch nicht weiter untersucht, da vor allem aus Gründen der Vergleichbarkeit Maßnahmen mit gleicher bzw. ähnlicher Probengeometrie und möglichst geringer Gewichtszunahme gesucht wer-



(a) Ergebnisse quasistatischer Zugscherbelastung



(b) Ergebnisse schlagartiger Zugscherbelastung

Abb. 6.2: Ergebnisse quasistatischer und schlagartiger Zugscherbelastung der

Blindnietklebung mit unterschiedlicher Überlappungslänge

Überlappungslänge: 16mm, 24mm und 32mm

Fügung im Karosseriebau

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

den. Die Versuche geben jedoch ein guten Eindruck über den Einfluss der Überlappungslänge auf das Probenverhalten, die Festigkeiten und Energieaufnahmen.

**ad 4:** Eine komplexere Verbindungsgeometrie wie z.B. eine geschäftete Verbindung oder mehrreihige Nietverbindungen ist aufgrund des Fertigungsaufwands und aus Kostengründen im Automobilbau nicht realisierbar. Aus diesen Gründen und aus Gründen der Vergleichbarkeit wird die gleiche Geometrie beibehalten und von einer geometrischen Modifikation des Fügebereichs abgesehen.

**ad 5:** Eine Erhöhung der Lochleibungseigenschaften verbessert vor allem das Tragverhalten des mechanischen Elements. Direkte Auswirkungen auf die Festigkeit der Klebung sind nicht vorhanden, da auf den Versagensmodus der Klebung kein Einfluss ausgeübt wird. Zur Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit sind folgende Maßnahmen denkbar:

1. Lokale Anpassung des Laminataufbaus im Fügebereich (vgl. Abb. 3.2, S. 49)
2. Stechen statt Bohren der Löcher vor der Aushärtung des Laminats [Sch07]
3. Aufdoppeln mit zusätzlichen FKV-Lagen [Sch07]
4. Aufdoppeln mit einem zusätzlich verklebten Blech [Sch07]
5. Einlaminieren oder Aufkleben unterschiedlicher metallischer Folien z.B. aus Titan, Stahl oder Aluminium [KHF07, KHF04, Sch07]
6. Auf- bzw. Einlaminieren kraftflussgerechter Einleger [Sch07, CKL<sup>+</sup>06, SWH<sup>+</sup>00]

Da der quasiisotrope Laminataufbau bereits für eine Bolzenanbindung geeignet ist (vgl. Abb. 3.2, S. 49), ist das Optimierungspotential durch eine Anpassung des Laminataufbaus bei gleicher Lagenanzahl begrenzt.

Ein Stechen statt Bohren der Löcher bedeutet einen großen Aufwand in der Bauteilherstellung, da das Loch während der Infiltrationsphase offen gehalten werden muss.

Da vor allem die hohen interlaminaren Belastungen im FKV zum Versagen führen, ist eine Verbesserung der Lamineigenschaften in Dickenrichtung, der Z-Richtung, sinnvoll. Es wird so neben der Verbesserung des primären Lastniveaus ebenfalls ein höheres sekundäres Lastniveau erreicht. Das Laminat wird nicht durch Delaminationen oder den Abriss der unteren Lagen geschwächt. Diese Verbesserung kann durch eine globale oder lokale Anpassung des Laminataufbaus erreicht werden, wie die Versuche der isolierten Proben belegen (Kap. 5.4.2, S. 96). Der Formschluss des Glasfasergewebes bewirkt eine verbesserte Krafteinleitung in den FKV.

Eine weitere Methode zum Abbau von Spannungsspitzen und damit zur Vermeidung von Delaminationen ist das Einlegen von Zwischenschichten in den FKV [Grz06]. Dieses führt zusätzlich zu einer Erhöhung der Materialstärke im Fügebereich und damit zu einer Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit. Trotz eines Anstiegs der interlaminaren Festigkeit und der Lochleibungsfestigkeit ist dieses Verfahren nur begrenzt einsetzbar, da der Lagenaufbau des FKV-Fügepartners durch die Funktion des Bauteils bestimmt wird. Ein Einlegen zusätzlicher Schichten zwischen den eigentlichen Laminatlagen ausschließlich im Fügebereich ist sehr aufwändig. Falls eine Aufdickung des Fügebereichs vermieden werden muss, bleibt nur das lokale Ersetzen einzelner Laminatlagen im Fügebereich übrig, was eine weitere Erhöhung des Fertigungsaufwands bedeutet.

Um die Krafteinleitung eines mechanischen Elements gezielt zu verbessern, kann das Laminat lokal im Fügebereich mit Hilfe von Aufdopplungen bzw. Aufdickungen oder lokalen Einlegern verstärkt werden.

Hier bieten sich Aufdopplungen und Einleger aus metallischen Folien, zusätzliche FKV-Lagen oder kraftflussgerecht gestaltete Faserverstärkungen an. Letztere können mit Hilfe der Tailored Fibre Placement-Technologie (TFP) ausgelegt und gefertigt werden [CDF<sup>+</sup>97, Ebe06, Sch07]. Die Fasern werden dabei kraftflussgerecht auf ein Trägermaterial abgelegt und mittels Sticken oder Nähen fixiert. Falls die Verstärkungen nicht direkt auf das Laminat als Trägermaterial aufgenäht werden, müssen sie nach der Her-

stellung zugeschnitten und auf bzw. zwischen den Laminatlagen positioniert werden. Mit einer Aufdopplung oder durch unterschiedliche Verstärkungen können Erstversagen und Lochleibungsfestigkeiten in Abhängigkeit von der Lochverstärkung unterschiedlich beeinflusst werden (Abb. 6.3, S. 130). Durch die Geometrie der Verstärkung und die damit verbundene Aufdopplung kann es im Lochbereich zu einer ungleichmäßigen Dickenverteilung kommen.

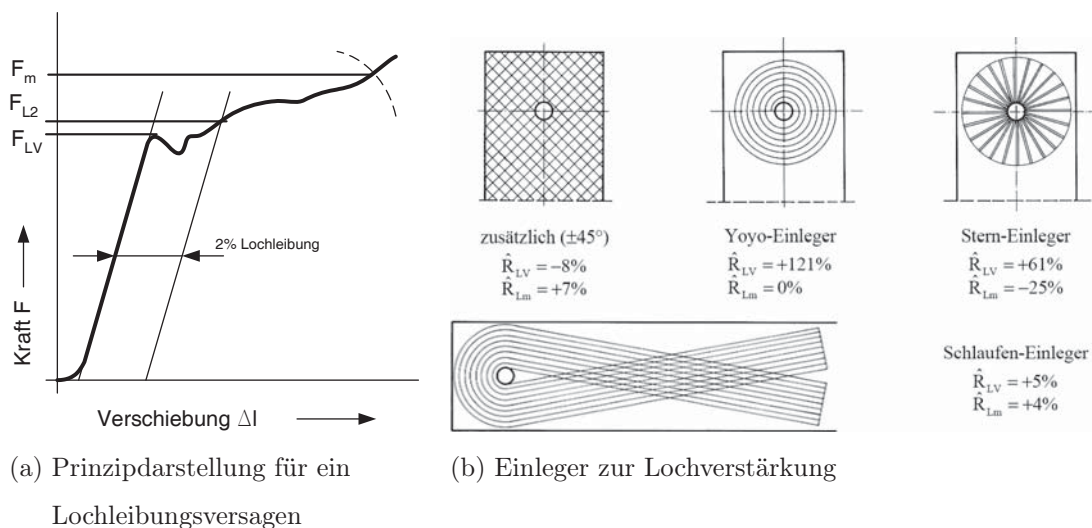
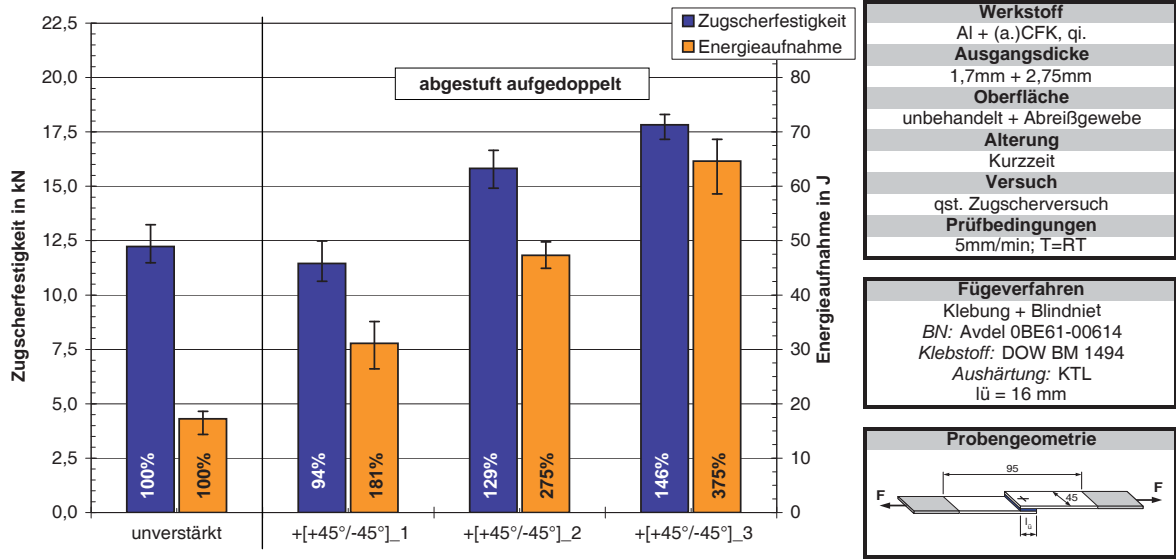


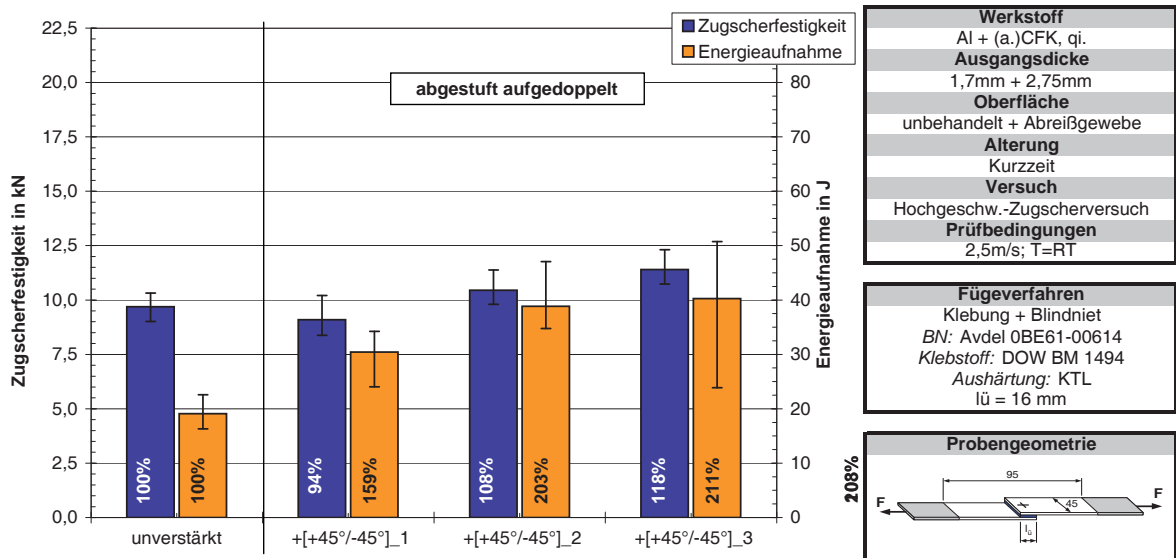
Abb. 6.3: Wirkung unterschiedlicher Einleger zur Lochverstärkung [Sch07]

Problematisch in der Verwendung lokaler TFP-Verstärkungen ist die Positionierung dieser Elemente, da die verstärkende Wirkung bei nicht exaktem Sitz des mechanischen Elements erheblich beeinflusst wird. Die Verstärkungswirkung ist durch die Festigkeit der Grenzschicht zwischen der Verstärkung und dem Laminat beschränkt. Zur besseren Krafteinleitung in den Faserverbundwerkstoff ist es sinnvoll, die Aufdopplung bzw. Einleger im Randbereich abzustufen oder zwischen den Lagen anzuordnen.

Um den Aufwand für die Verstärkung struktureller Verbindungen möglichst gering zu halten, kommt häufig nur eine Aufdopplung mit zusätzlichen  $[+45^\circ / -45^\circ]$ -Lagen in Frage. Zugscherergebnisse auf der Setzseite des mechanischen Elements aufgedoppelter Proben zeigen sowohl bei quasistatischer wie auch bei schlagartiger Belastung vor allem eine Erhöhung der Energieaufnahme (Abb. 6.4, S. 131). Vor allem bei der quasi-



(a) Ergebnisse quasistatischer Zugscherbelastung



(b) Ergebnisse schlagartiger Zugscherbelastung

Abb. 6.4: Ergebnisse quasistatischer und schlagartiger Zugscherbelastung der

Blindnietklebung mit aufgedoppeltem Fügebereich

Aufdopplung setzseitig:  $+[+45^\circ/-45^\circ]_1$ ,  $+[+45^\circ/-45^\circ]_2$  und  $+[+45^\circ/-45^\circ]_3$

Fügung im Karosseriebau

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

statischen Prüfung ist die Zugscherfestigkeitserhöhung deutlich zu beobachten. Dieses wird primär durch die höheren Lochleibungsfestigkeiten des Blindniets im sekundären Tragverhalten hervorgerufen. Aufgrund der höheren Materialstärke des FKV im Fügebereich wird beim Setzen des Blindniets ein höherer axialer Anpressdruck erzeugt, der sich zum einen positiv auf die Klebung auswirkt, zum anderen den Reibschluss erhöht und das Verkippen des mechanischen Elements vermindert [Sch07]. Weiter wird der Fügebereich durch die Aufdopplung versteift, so dass die Rotation des Fügebereichs verringert und somit eine Abminderung der Schälkräfte bewirkt wird.

**ad 6:** 3D-Faserhalbzeuge wie 3D-Geflechte oder 3D-Gewebe besitzen Verstärkungsfasern in der Z-Richtung [KCPC00], die die interlaminaren Eigenschaften verbessern. Sie befinden sich teilweise noch in der Entwicklungsphase und sind in ihrer Größe noch sehr beschränkt. Gestricke erhöhen zwar die Schlagzähigkeit von Laminaten, haben aber nur sehr schwache mechanische Eigenschaften. Alle 3D-Faserhalbzeuge sind noch nicht in großen Mengen verfügbar und werden aufgrund der hohen Kosten bisher nur sehr begrenzt in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt [Ban01, Sch07]. Eine Anwendung im Automobilbau kann somit in näherer Zeit ausgeschlossen werden.

**ad 7:** Ein Lösungsansatz zur 3D-Verstärkung des Laminats ist das lokale Einbringen von Fasern in Laminatdickenrichtung (Z-Richtung), im Folgenden Z-Verstärkung genannt. Eine verbesserte Kopplung der Lagen in Dickenrichtung erhöht vor allem die Schälfestigkeit (Mode I) [DJM98], so dass Delaminationen verhindert werden können. Positive Auswirkungen auf die Festigkeiten bei Schub- bzw. Längsscherung (Mode II) [JDM98] und bei Querschere (Mode III) [GRCP99] sind ebenfalls in geringerem Umfang vorhanden.

Die Verbesserung dieser Kennwerte außerhalb bzw. senkrecht zur Laminebene (out-of-plane) ist abhängig von Art und Dichte der Z-Verstärkung. Die Verstärkung der out-of-plane Eigenschaften ist verbunden mit einem Absinken der in der Laminebene (in-plane) liegenden Eigenschaften. Neben Faserbrüchen beim Einbringen der Z-

Verstärkung kommt es je nach Größe und Anzahl der Z-Verstärkungen zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Störung des Laminataufbaus durch die Verdrängung und damit Auslenkung der Fasern in der Laminebene. In den entstehenden Freiräumen kommt es zu einer Harzansammlung, den sogenannten Harznestern, mit negativen Auswirkungen auf die Lamineigenschaften [SF06]. Es sind Verstärkungen aus den unterschiedlichen Fasern als Filamentbündel (Roving) oder Garn, aber auch metallische Stifte einsetzbar. Die Verstärkungen werden vor der Aushärtung in das Laminat eingebracht [GZM02, PC05].

Ein Verfahren eine Verstärkung in Dickenrichtung in das Laminat einzubringen, ist das Z-Pinning [Tro03]. Beim Z-Fiber®-Pinning sind die Verstärkungsmaterialien in einem Schaum senkrecht zum Laminat gelagert und werden mittels Druck oder Ultraschall aus dem Schaum heraus in das Laminat getrieben. So können auch Prepregmaterialien verstärkt werden. Es werden Verbesserungen der out-of-plane Eigenschaften und der Lochleibungsfestigkeiten beobachtet [CKL<sup>+</sup>06]. Dieses Verfahren sorgt für eine sehr gute Qualität der Z-Verstärkung und verursacht nur relativ kleine Störstellen im FKV, ist jedoch sehr aufwändig und damit kostenintensiv.

Der einfachste und kostengünstigste Weg 3D-verstärkte Faserverbundstrukturen zu erstellen ist mit Hilfe der Textiltechnik. Dabei werden die trockenen Faserhalbzeuge automatisiert miteinander vernäht. Eine genaue Beschreibung der verfügbaren Verfahren erfolgt in Kapitel 6.2 (S. 134).

Durch strukturelles Nähen werden die Schadenstoleranz, das Energieabsorptions- und das Rissausbreitungsverhalten eines Laminats signifikant verbessert, wie unterschiedliche Untersuchungen belegen [SWH<sup>+</sup>00, Gef01, Lar97, DCPR07, MLH97]. Dabei hat die Vernähung vor allem eine rissstoppende Wirkung. Der verstärkende Effekt durch eine Vernähung ist lokal sehr beschränkt. Beispielsweise zur Erhöhung der Restfestigkeit nach einer Schlagbelastung (Impact) oder der Verbindungsfestigkeiten einer vernähten Verbindung ist es nötig, die Bauteile flächig mit einem Raster von ca.  $2 \times 2 \text{ mm}$  bis  $3 \times 3 \text{ mm}$  zu vernähen [SWH<sup>+</sup>00, TJWC08].



Da im Automobilbau aus wirtschaftlichen Gründen meist Multiaxialgelege verwendet werden, ist es möglich und sinnvoll hier die textile Fertigungstechnik einzusetzen. Textile Nähverfahren weisen zudem eine hohe Produktivität auf, so dass sie sich für eine Anwendung im Automobilbau eignen. Im hier vorliegenden Anwendungsfall ist es ausreichend die hoch belasteten Bereiche der Krafteinleitung, also die Fügebereiche, zu vernähen, um eine verstärkende Wirkung und somit eine bessere Werkstoffausnutzung für ein Bauteil zu erzielen. Dadurch werden die Bauteileigenschaften nur im Fügebereich beeinflusst und die Verarbeitungszeit wird gering gehalten.

## 6.2 Z-Verstärkung mit Hilfe der Textiltechnik

Im Folgenden soll die besonders vielversprechende Nähtechnik näher beschrieben werden. Textile Nähverfahren sind effizient und aus der Textilindustrie bekannt. Um den Verlust der in-plane Eigenschaften möglichst gering zu halten, ist darauf zu achten, dass es nicht durch eine zu hohe Fadenspannung zu einer Einschnürung des Nähguts kommt und so Störstellen im Laminat unnötig vergrößert werden.

Nach Anpassung der aus der Bekleidungsindustrie bekannten Nähmaschinen stehen verschiedene Nähverfahren sowohl zum Konfektionieren [Kör02, Zha08, FDB03] als auch zum strukturellen Verstärken der Faserhalbzeuge zur Verfügung. Die größte Herausforderung bei der Maschinenadaption ist die Verarbeitung spröder Verstärkungsfäden mit hoher Geschwindigkeit.

Konfektionierung und strukturelle Verstärkung unterscheiden sich beim Verarbeitungsprozess nur durch den gewählten Nähfaden. Zur Konfektionierung werden meist dünne Polyesterfäden verwendet, um die Störstellen im Material möglichst klein zu halten. Für die strukturellen Vernähungen werden vor allem Aramid-, Glas- und Kohlenstofffasern eingesetzt, da diese ausreichend hohe Steifigkeiten und Festigkeiten besitzen.

Da die Fügebereiche in der Regel im Randbereich der Bauteile liegen, findet mit ihrem strukturellen Vernähen gleichzeitig eine Konfektionierung der Faserhalbzeuge statt. Durch die Konfektionierung wird die Handhabbarkeit des trockenen Faservorformlings (Preform) verbessert, so dass dieser problemlos transportiert werden kann. Dies, gezielt eingesetzt, bringt Flexibilität und Kostenersparnis. Eine Prozesskette mit verschiedenen Stationen bzw. Zulieferern ist hier denkbar. Zusätzlich werden durch die Konfektionierung die Prozesszeiten zur Bauteilherstellung verkürzt, da die Preform außerhalb der Form vorbereitet werden kann und nicht im Werkzeug aufgebaut bzw. die einzelnen Lagen nicht im Werkzeug drapiert werden müssen. Somit kann der größere Aufwand, den eine Vernähung in der Bauteilherstellung erfordert, neben der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften auch wirtschaftlich gerechtfertigt werden.

Um eine ebene Preform aus MAG zu verarbeiten, kommen CNC-Portalnähmaschinen zum Einsatz. In Abhängigkeit von der Größe der CNC-Portalnähmaschine (Abb. 6.5, S. 135) sind auch sehr große Preforms wie die Preform der Druckkalotte des Airbus A380 herstellbar [FDB03]. Verwendet werden die aus der Bekleidungstechnik bekannten und

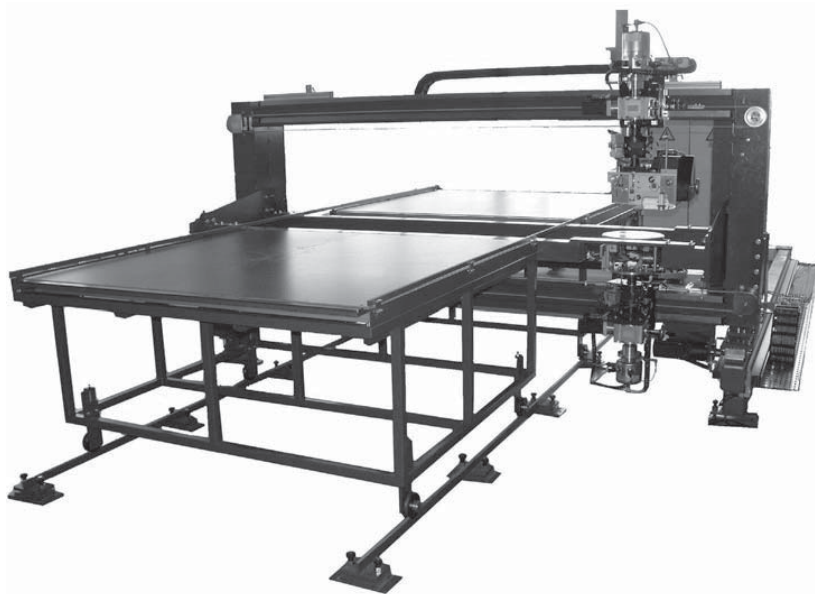


Abb. 6.5: CNC-Portalnähmaschine KSL KL 115; Nähverfahren: Doppelsteppstich bzw. modifizierter Doppelsteppstich [Köb06]

in der DIN 61400 [DIN02] genormten Nähstichtypen: Doppelsteppstich, Einfaden- und Zweifadenkettenstich (Abb. 6.6, S. 136).

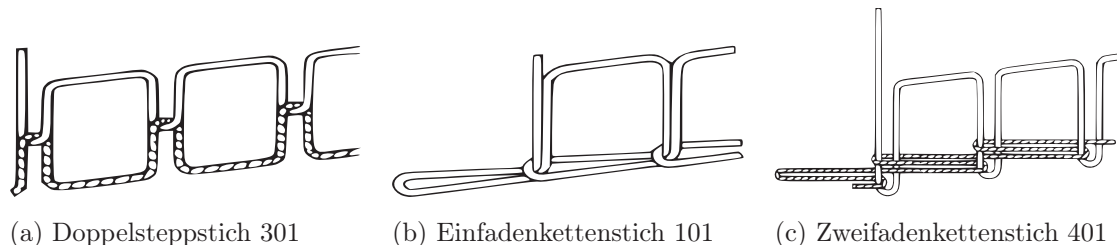


Abb. 6.6: Nahtstichtypen [DIN02]

Besonders geeignet ist der Doppelsteppstich. Bei ihm besteht die Möglichkeit, die Überkreuzung von Ober- und Unterfaden auf die Nähgutunterseite zu positionieren (modifizierter Doppelsteppstich). So können Störungen und eine hohe Faserondulation im Laminat gering gehalten werden. Durch Modifikation der Nähköpfe können mittlerweile sogar spröde Faserwerkstoffe wie Kohlenstofffasern mit einer Stichzahl von über  $1000\text{Stich}/\text{min}$  verarbeitet werden [FDB03], was die Nähzeit kurz hält und diese Maschinen produktiv arbeiten lässt.

Ergänzend zu den zweidimensionalen (2D) Nähportalen werden Nähköpfe auf Industrieroboter montiert, um so robotergeführt dreidimensionale (3D) Strukturen u.a. bei einseitiger Zugänglichkeit zu vernähen<sup>3</sup>. Beim 2-Nadelnähkopf [Wit01, Kei] (Abb. 6.7a, S. 137) wird von zwei unter  $45^\circ$  zueinander stehenden Nadeln das Nähgut mit einem einfädiger Kettenstich, ähnlich dem Stichtyp 108 nach DIN 61400 [DIN02], mit einseitiger Zugänglichkeit mit einer maximal erreichbaren Stichgeschwindigkeit von ca.  $500\text{Stich}/\text{min}$  vernäht [Kei, Gri07]<sup>4</sup>.

<sup>3</sup>Im Rahmen des BMBF Projektes INTEX [Geß01] wurden am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen in Kooperation mit verschiedenen Industriepartnern unterschiedliche robotergeführte Nähköpfe entwickelt, die das Vernähen dreidimensionaler Strukturen bei einseitiger Zugänglichkeit ermöglichen.

<sup>4</sup>Dieses Verfahren wird beispielsweise von der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden zur Konfektion von Hochleistungsrotorblätter eingesetzt [Zha08]

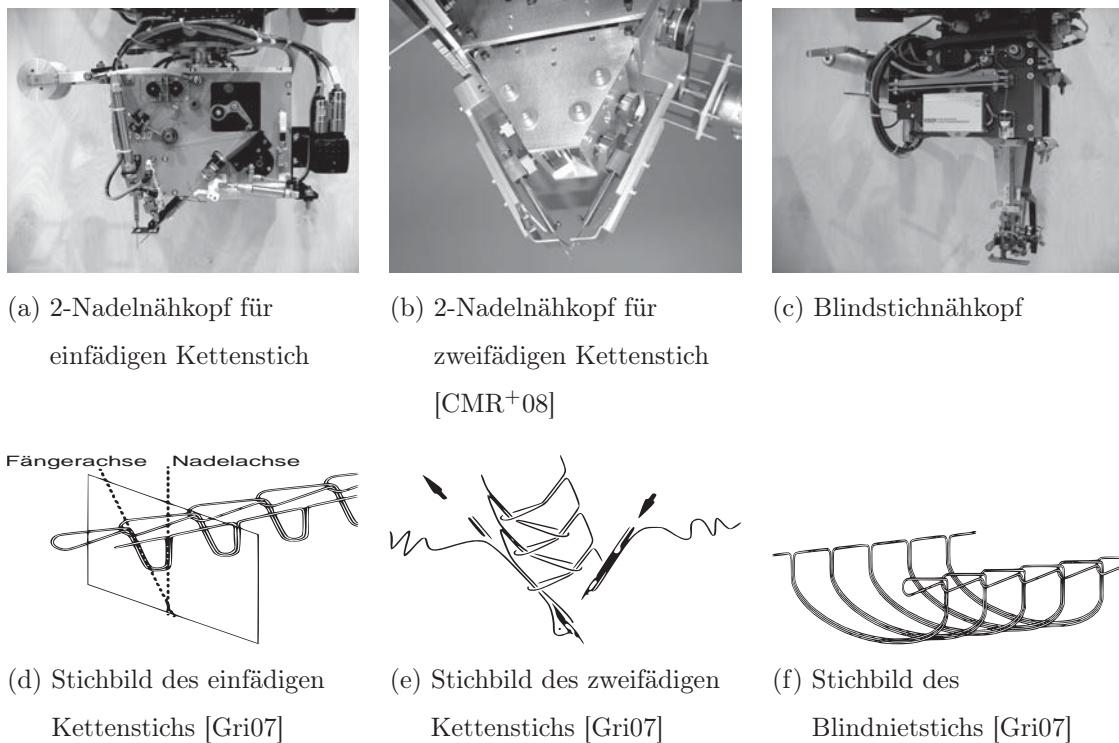
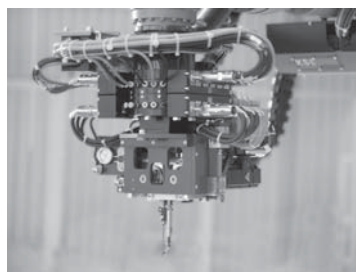


Abb. 6.7: Robotergeführte Einseitnähverfahren

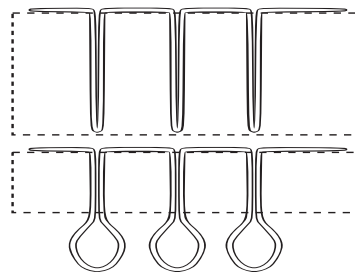
Ein vom Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen weiterentwickelter Nähkopf (Abb. 6.7b, S. 137) bildet bei einseitiger Zugänglichkeit einen Zweifadenkettenstich und erlaubt somit höhere Stichgeschwindigkeiten von maximal  $1400\text{Stich}/\text{min}$  ( $2 \times 700\text{Stich}/\text{min}$ ) [Gri07]. Diese einseitigen Nähverfahren benötigen einen Freiraum auf der Rückseite des Nähguts, weil die Nadeln beim Nähen das Nähgut zum Verschlaufen des Nähfadens durchdringen.

Aus diesem Grund wurde für das zu den einfachen Kettenstichen zählende Blindstichverfahren (Abb. 6.7f, S. 137) ein geeigneter Nähkopf (Abb. 6.7c, S. 137) entwickelt [Gri07, Geß01]. Das Nähgut wird dabei von der Nähkopfseite aus mit einer Bogennadel durchdrungen und auf der Nähgutoberseite verschlauft. Die Einstichtiefe kann so gewählt werden, dass kein Austreten der Nadel auf der Rückseite des Nähguts erfolgt. Die Stichbildung kann senkrecht oder parallel zur Bogennadel mit einer Stichfrequenz von ca.  $200\text{Stich}/\text{min}$  erfolgen.

Neben den verschlaufenden Nähverfahren wurde zusätzlich das Tufting entwickelt. Ein Tuftingkopf (Abb. 6.8a, S. 138) erreicht in Abhängigkeit von der Einstichtiefe ca.  $200\text{Stich}/\text{min}$  [Kei]. Bei diesem Verfahren wird das Nähgut mit der Nadel durchstochen. Durch die Reibung zwischen Nähgut und Faden verbleibt der Faden im Nähgut. Je nach Einstich- bzw. Durchstichtiefe verbleibt der Faden im Nähgut oder es kommt auf der Rückseite des Nähguts zu einer Schlaufenbildung (Abb. 6.8b, S. 138). Dies erfordert dann einen Freiraum auf der Rückseite des Nähguts. Für die Infiltration werden die Schlaufen umgelegt und mit dem Harz auf der Laminatoberfläche konsolidiert.



(a) Tuftingkopf



(b) Tuftingstichbilder bei unterschiedlicher Einstichtiefe [Gri07]

Abb. 6.8: Tufting

Im Gegensatz zu den verschlaufenden Verfahren arbeitet das Tufting mit einer geringen Fadenspannung, so dass die Naht nahezu spannungsfrei in das Nähgut eingebracht werden kann. Ein Einschnüren in Dickenrichtung (Trichterbildung) durch die Fadenspannung und ein damit verbundener Abfall der in-plane Eigenschaften des Laminats wird aufgrund der geringen Fadenspannung auf ein Minimum reduziert [SWH<sup>+</sup>00, Wit01]. Da die Z-Verstärkung nur durch Reibung im Laminat gehalten wird, eignet sich dieses Verfahren nur eingeschränkt zur Konfektionierung.

Beim Tufting ist es zusätzlich möglich, den Verstärkungsfaden in einem Winkelbereich von  $45 - 135^\circ$  in das Laminat einzubringen. So kann der Verstärkungseffekt gezielter eingesetzt werden [FDB03, Wit01, Kei].

## 6.3 Festigkeitsuntersuchungen Z-verstärkter Proben

Für die Z-Verstärkung der Fugebereiche wird das Tufting gewählt, weil dieses Verfahren sehr flexibel einsetzbar ist und sich somit für alle Versuche eignet. Zur Verstärkung des quasiisotrop aufgebauten Geleges (v.CFK) wird ein robotergeführter KSL RS 522 Tuftingnähkopf verwendet. Um einen Verfahrenseinfluss ausschließen zu können, werden parallel dazu ausgewählte Versuche mit der am Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart verfügbaren KSL KL 115 CNC-Portalnähmaschine mit dem modifizierten Doppelsteppstich vernäht. Anschließend werden die Faserhalbzeuge regulär mit dem Harzinfusionsverfahren infiltriert und ausgehärtet (vgl. Kap 5.1.2, S. 69).

### 6.3.1 Grundlagenuntersuchungen Z-verstärkter Proben

Um den Effekt einer Z-Verstärkung zu verstehen und zu optimieren, müssen folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

1. Grundlagenuntersuchungen zur Identifikation einer optimalen Verstärkung
  - Vergleich verschiedener Verstärkungsfäden
  - Untersuchung verschiedener Stichparameter:  
Stichraster, Stichmuster und Nahtpositionierung
  - Vergleich verschiedener Nähverfahren
  - Untersuchung des Z-verstärkten Grundwerkstoffs:  
Beeinflussung der in-plane und out-of-plane Eigenschaften
2. Erweitertes Versuchsprogramm zum Vergleich mit den Ergebnissen des Grundlagenversuchsprogramms mit Fügung in Karosseriebau (Kap. 5.4.2, S. 96) und Fügung in der Montage (Kap. 5.4.3, S. 109)

### 6.3.1.1 Untersuchung verschiedener Verstärkungsfäden

Zur Untersuchung verschiedener Verstärkungsfäden werden die bereits bekannten Zugversuche mit Blindnietklebung im Karosseriebau aufgebaut. Um eine Vergleichbarkeit der Verstärkungsfäden untereinander zu erreichen, wird die Fadenstärke der Fäden so gewählt, dass diese ähnliche Absolutsteifigkeiten besitzen. Die untersuchten Fadentypen sind in Tabelle 6.1 (S. 140) aufgeführt und werden mittels Tufting in das quasiisotrop aufgebaute Gelege eingebracht, um somit den Einfluss der Fadenspannung auszuschließen.

Tab. 6.1: Daten der für die Z-Verstärkung verwendeten Fasertypen

Nr.	Fasertyp	Halbzeug	Fadengewicht
1	Aramid (Kevlar)	Garn	120tex
2	E-Glas	Garn	102tex
3	HTA-Kohlenstoff	Roving	67tex

Für die Vergleiche wird ein Rechteckraster von  $3,5 \times 3,5 \text{ mm}$  gewählt. Die erste Zahl der Rasterbeschreibung entspricht der Stichweite, während die zweite Angabe den Nahtabstand beschreibt. Die CFK-Gelege werden dabei mit sieben Bahnen senkrecht zur Prüfrichtung vernäht, so dass ein Bereich von  $21 \text{ mm}$  über die gesamte Probenbreite verstärkt wird. Die CFK-Fügepartner werden so zugeschnitten, dass sich das Überlappungsende des Al-Fügepartners genau zwischen zwei Nahtbahnen befindet.

Die Verwendung des Aramid- und des Glasfasergarns für die Z-Verstärkung erweist sich prozesstechnisch als problemlos. Eine Verarbeitung des Kohlenstofffaserrowings ist jedoch nur mit niedrigen Stichgeschwindigkeiten möglich, da es bei hohen Nähgeschwindigkeiten wegen des spröden Werkstoffverhaltens häufig zu Faserbrüchen kommt. Die unterschiedlich verstärkten Zugversuche zeigen keinen wesentlichen Festigkeitsgewinn durch die Z-Verstärkung (Abb. 6.9, S. 141). Bei allen drei Verstärkungsfäden jedoch ist eine deutliche Zunahme der Energieaufnahme zu verzeichnen. Das Laminat

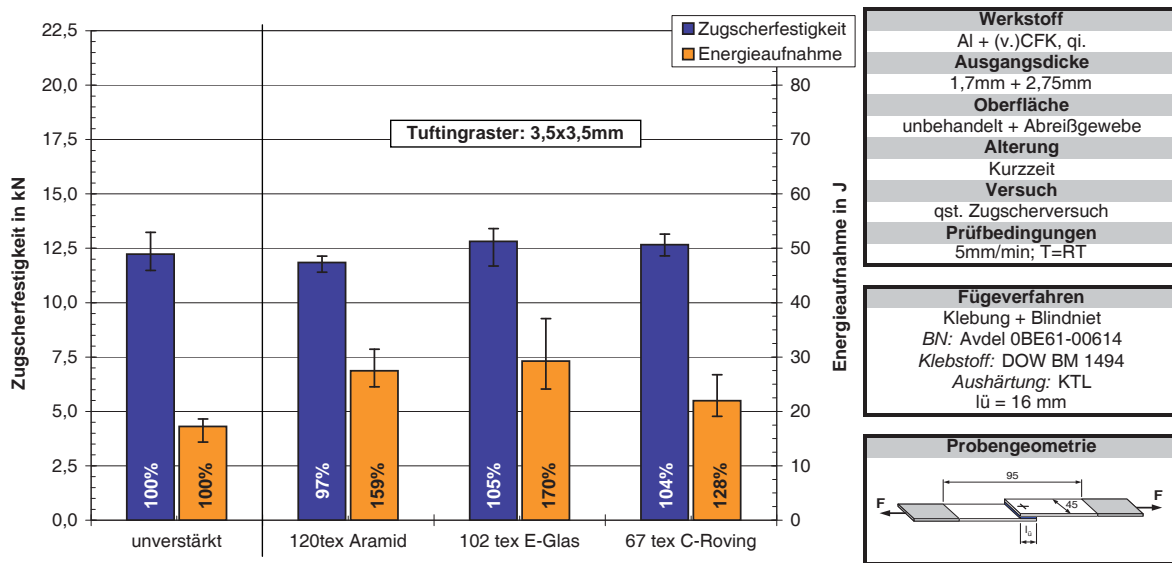


Abb. 6.9: Ergebnisse quasistatischer Zugscherversuche der Blindnietklebung CFK-Fügepartner mit div. Verstärkungsfäden getuftet (Raster 3, 5x3, 5mm) Fügung im Karosseriebau  
**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

bleibt nach Versagen der Klebung optisch kompakter und es sind keine großflächigen Delaminationen im CFK-Fügepartner feststellbar (Abb. 6.12, S. 145). Die mit der Klebschicht abgerissenen Faseranteile sind kleiner im Vergleich zu den unverstärkten Proben (Abb. 6.11, S. 144). Damit wird die Vorschädigung bis zum Versagen der Klebung verringert und ein ausgeprägtes sekundäres Lastniveau erreicht, was die erhöhte Energieaufnahme erklärt. Eine Erhöhung der Festigkeit der Klebung wird nicht erreicht, da das Versagen der Klebung weiterhin durch den Abriss der äußeren Harzschicht bestimmt wird.

Als besonders geeignet erweisen sich das Aramid- und das Glasfasergarn für eine 3D-Verstärkung. Zum einen sind diese Garne gut zu verarbeiten und zum anderen wird durch die Vernähung mit diesen Garnen die Energieaufnahme der mit einem 3, 5x3, 5mm Raster verstärkten Mischverbindungen deutlicher als bei Verwendung des Kohlenstofffaserrowings erhöht.



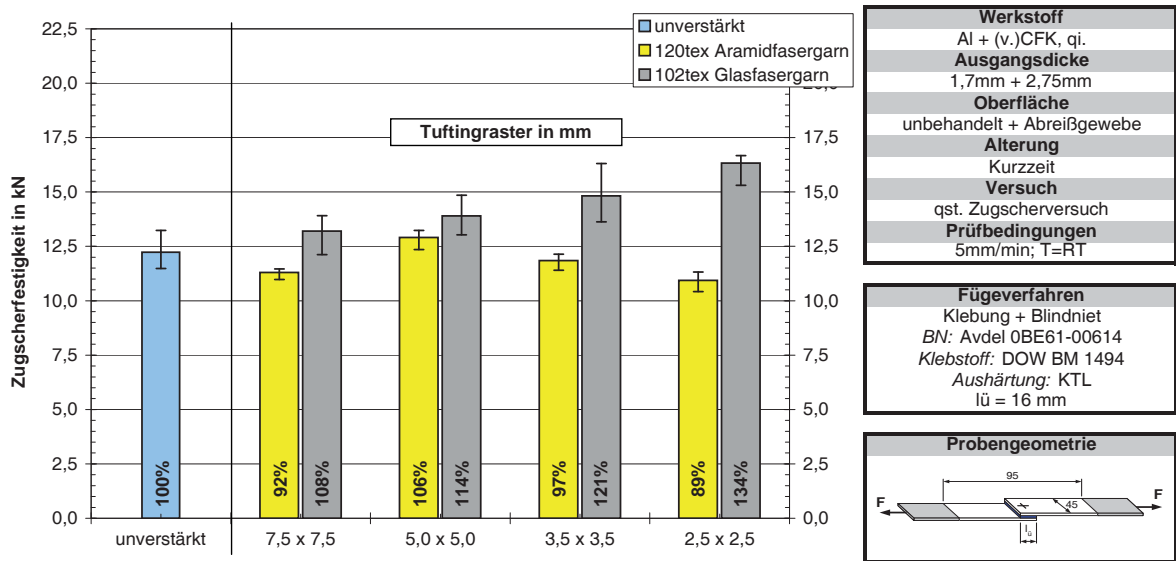
### 6.3.1.2 Untersuchung verschiedener Stichparameter

Um einen optimalen Verstärkungseffekt zu erreichen, sind Variationen der Stichparameter zu untersuchen. Für eine Z-Verstärkung mit dem Aramid- und dem Glasfasergarn werden zunächst Stichrastervariationen durchgeführt.

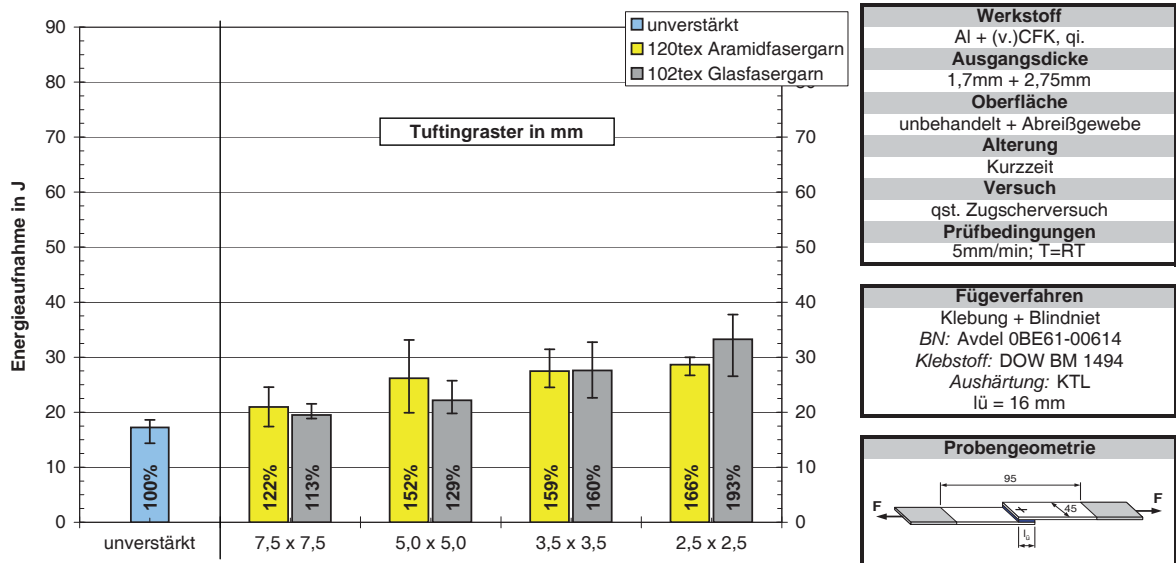
Die Ergebnisse der Zugscherversuche der Mischverbindungen zeigen, dass bei der Verwendung des Aramidfasergarns die Festigkeit gegenüber der ungetufteten Probe nicht erhöht sondern bei hohen Stichdichten tendenziell verringert wird (Abb. 6.10a, S. 143). Im Gegensatz dazu ist bei den mit dem Glasfasergarn verstärkten Proben nahezu ein linearer Zusammenhang zwischen der Rasterweite und dem Festigkeitszuwachs festzustellen. Dies ist auf den Verdrängungseffekt der Garne und der Größe der in das CFK-Laminat eingebrachten Störstellen zurückzuführen. Bei den hier verwendeten Verstärkungsgarnen besitzt das Glasfasergarn einen geringeren Durchmesser als das Aramidfasergarn. Somit sind beim Glasfasergarn die durch die Z-Verstärkung eingebrachten Störstellen kleiner, was sich bei ähnlicher Absolutsteifigkeit der Z-Verstärkung positiv auf die Laminatfestigkeiten auswirkt [GZ03].

Untersuchungen dichter Stichmuster mit Glasfasergarn getufteter Proben haben gezeigt, dass bei Stichmustern dichter als  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  eine Sättigung eintritt und kein weiterer Festigkeitszuwachs erreicht wird. Zudem sind engere Stichweiten wegen der hohen Fadenumlenkung prozesstechnisch schwierig zu realisieren.

Im Gegensatz zu den Zugscherfestigkeiten nimmt die Energieaufnahme bei den mit Aramid- und Glasfasergarn getufteten Proben mit der Stichdichte zu (Abb. 6.10b, S. 143). Bei den mit Aramidfasergarn getufteten Proben wird dies durch ein ausgeprägtes sekundäres Lastniveau hervorgerufen. Da die Festigkeiten der mit Aramidfasergarn getufteten Proben nicht erhöht werden, ist keine zusätzliche Energieaufnahme durch ein Fließen im Aluminiumpartner im primären Lastniveau zu erzielen. Zusätzlich zum verbesserten sekundären Tragverhalten wird durch den Festigkeitszuwachs der mit dem

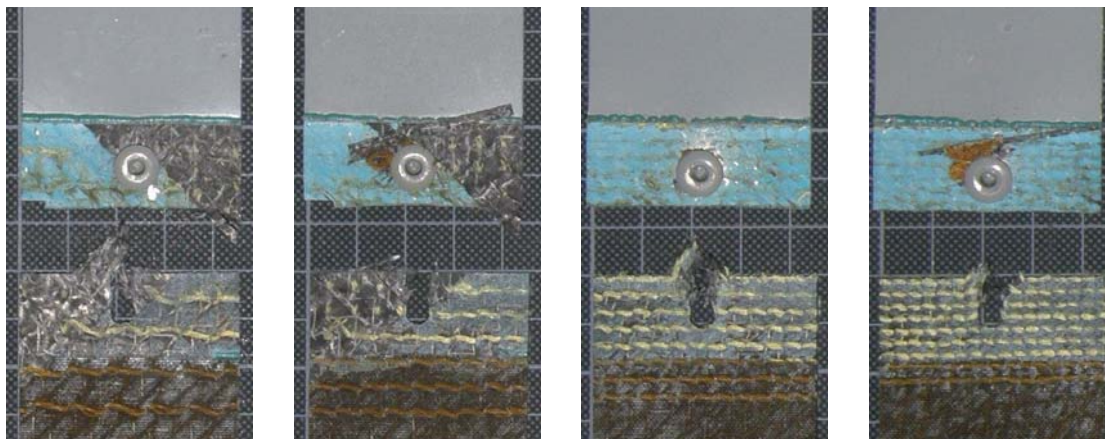


(a) Zugscherfestigkeiten

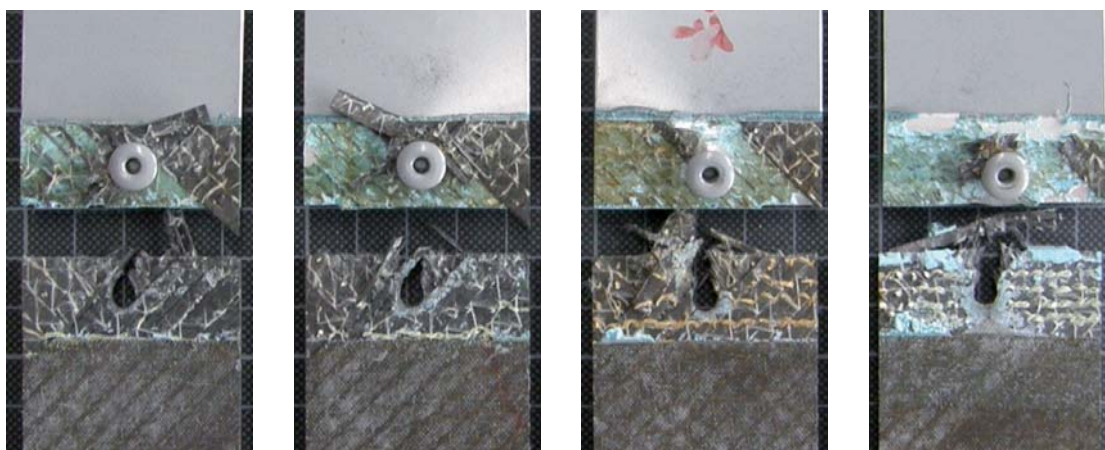


(b) Energieaufnahmen

Abb. 6.10: Zugscherfestigkeiten und Energieaufnahmen quasistatischer Zugscherversuche der unverstärkten und der Z-verstärkten Blindnietklebung CFK-Fügepartner mit Aramid- und Glasfasergarn mit unterschiedlichen Stichrastern getuftet  
Fügung im Karosseriebau



(a) Mit Aramidfasergarn getuftet



(b) Mit Glasfasergarn getuftet

Abb. 6.11: Bruchbilder mit Aramid- und Glasfasergarn getufteter Proben

Stichraster von links nach rechts:

$7,5 \times 7,5 \text{ mm}$ ,  $5,0 \times 5,0 \text{ mm}$ ,  $3,5 \times 3,5 \text{ mm}$ ,  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$

Fügung im Karosseriebau

Glasfasergarn getufteten Proben ein Fließen des Al-Fügepartners im primären Lastniveau von 0,2 bis 0,6% erreicht, so dass die Energieaufnahmen im Vergleich zur unverstärkten Probe auf fast das 2-fache gesteigert werden können.

Mit zunehmender Stichdichte werden die Rissausbreitung im Laminat erschwert und so die Energiefreisetzungsrate des Laminats, also für das Risswachstum benötigte Ener-

gie, erhöht [INW09], so dass die beim Versagen der Klebung abgerissenen Faseranteile geringer ausfallen. Ab einer Stichdichte von ca.  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  ist kaum ein Faserabriss mehr festzustellen, was die Sättigung der Festigkeit und Energieaufnahme ab dieser Stichweite erklärt. Dieses gilt sowohl für eine Verstärkung mit dem Aramid- als auch mit dem Glasfasergarn (Abb. 6.11, S. 144).

Durch die lokale Vernähung im Fugebereich werden Delaminationen verhindert bzw. verringert, wie das Schliffbild des Fugebereichs eines mit Glasfasergarn verstärkten CFK-Fügepartners nach Versagen der Klebung zeigt (Abb. 6.12, S. 145). Im Gegensatz zum Schliffbild des unverstärkten CFK-Fügepartners nach Versagen der Klebung (Abb. 6.1b, S. 124) sind hier keine Schädigungen im CFK-Laminat zu erkennen. Ein vorzeitiges großflächiges interlaminares Versagen wird verhindert und eine höhere Festigkeit des primären Lastniveaus erreicht. Weiter werden durch eine Vernähung die Vorschädigungen durch die hohen Schälspannungen bis zum Versagen der Klebung reduziert, so dass zusätzlich die Verbindungsfestigkeiten des sekundären Lastniveaus verbessert werden.

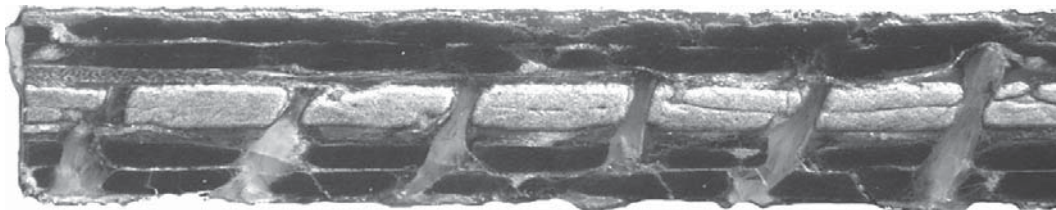


Abb. 6.12: Schliffbild im Fugebereich des Z-verstärkten CFK-Laminats nach Versagen der Klebung; Schliffbildebene: Probenmitte und  $\parallel$  zur Zugrichtung  
CFK mit einem  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  Raster mit Glasfasergarn getuftet (v.CFK)  
Fügung im Karosseriebau

Über die Verringerung der Vorschädigung hinaus wirkt sich die Z-Vertärkung positiv auf die Lochleibungsfestigkeit des CFK-Laminats aus, wie Lochleibungsversuche nach DIN EN 6037 [DIN96a] mit einem ungestützten Bolzen belegen. Bei einem Stichmuster von  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  verbessert die Z-Verstärkung die Lochleibungsfestigkeiten und führt

somit zu einer Anhebung des sekundären Lastniveau und somit zu einer verbesserten Energieaufnahme (Abb. 6.13, S. 146).

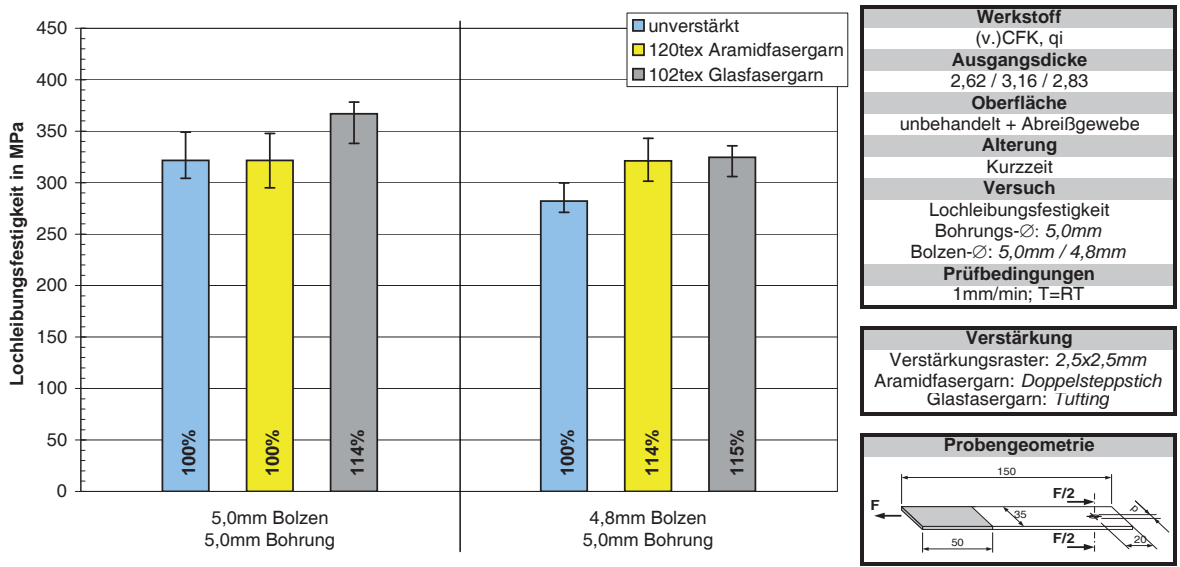


Abb. 6.13: Ergebnisse quasistatischer Lochleibungsversuche mit ungestütztem Bolzen; CFK-Laminat unverstärkt bzw. Aramid- und Glasfasergarn verstärkt Fügung im Karosseriebau

Unverstärkte und mit Aramidfasergarn vernähte Proben zeigen bei Verwendung eines Passbolzens dieselben Versagenslasten (5,0mm Bolzen in einer 5,0mm Bohrung). Der verstärkende Effekt des Aramidfasergarns wird durch die mit dem Aramidfasergarn in das CFK-Laminat eingebrachten Störungen kompensiert. Ein mit Glasfasergarn verstärktes Laminat besitzt aufgrund des dünneren Garns eine 14% höhere Lochleibungsfestigkeit als das unverstärkte Laminat.

Bei Verwendung eines 4,8mm Bolzens in einer 5,0mm Bohrung weisen die unverstärkten Proben durch die Spielpassung einen Festigkeitsabfall von 12% auf. Im Gegensatz dazu ist bei den Aramidfasergarn verstärkten Proben kein Abfall der Lochleibungsfestigkeit feststellbar, während die Festigkeit der mit Glasfasergarn verstärkten Proben auf dieses Niveau absinkt, d.h. die Lochleibungsfestigkeit des Z-verstärkten CFK-Laminats liegt etwa 14 bis 15% über der Lochleibungsfestigkeit des unverstärkten CFK-Laminats.

Zudem wirkt sich die Vernähung positiv durch einen flacheren Versagensfortschritt nach dem Lochleibungserstversagen auf die Energieaufnahme aus.

Der Z-verstärkte CFK-Grundwerkstoff ist gegenüber Spielpassungen, wie sie aus fertigungstechnischen Gründen im Automobilbau verwendet werden, wesentlich toleranter als das unverstärkte Laminat.

Um abschließend die Robustheit des Verfahrens zu prüfen, werden Versuche mit unterschiedlicher Nahtanordnung und unterschiedlicher Nahtpositionierung durchgeführt. Ein  $5,0 \times 5,0 \text{ mm}$  Stichmuster, bei dem erste Verstärkungseffekte erkennbar sind, wird als Rechteckmuster und als Rautenmuster mit dem Aramidfasergarn ausgeführt. Beim Rautenmuster wird der Nahtabstand von  $5,0 \text{ mm}$  beibehalten, jedoch jede zweite Naht auf Lücke gesetzt, so dass sich der Abstand der Einstiche zueinander maximiert. Die anschließenden Zugscherversuche zeigen im Rahmen der Streuung dieselben Ergebnisse. Das Verstärkungsverfahren erweist sich somit als robust gegenüber dem Stichraster.

Zur Untersuchung des Positionierungseinflusses der Fügepartner zueinander wird der CFK-Fügepartner wieder mit einem  $5,0 \times 5,0 \text{ mm}$  Rechteckmuster mit Hilfe des Aramidfasergarns verstärkt. Bei gleichbleibender Überlappung von  $16 \text{ mm}$  wird das Überlappungsende des Al-Fügepartners zum einen auf eine Naht und zum anderen um  $2,5 \text{ mm}$  versetzt zwischen zwei Nahtbahnen positioniert. Zwischen den beiden Versuchsreihen sind ebenfalls nur Unterschiede im Rahmen der normalen Streuung zu verzeichnen. Es zeigt sich, dass bei diesen engen Stichmustern der Verstärkungseffekt unabhängig von der Positionierung der Überlappungsenden ist.

### 6.3.1.3 Vergleich verschiedener Nähverfahren

Mischverbindungen, bei denen die Verstärkungsfäden mittels Tufting eingebracht wurden, zeigen ähnliche Festigkeiten und Energieaufnahmen wie die entsprechenden mit dem modifizierten Doppelsteppstich verstärkten Verbindungen (Abb. 6.14, S. 148). Dies gilt sowohl für mit Aramid- als auch für mit Glasfasergarn verstärkte Proben.

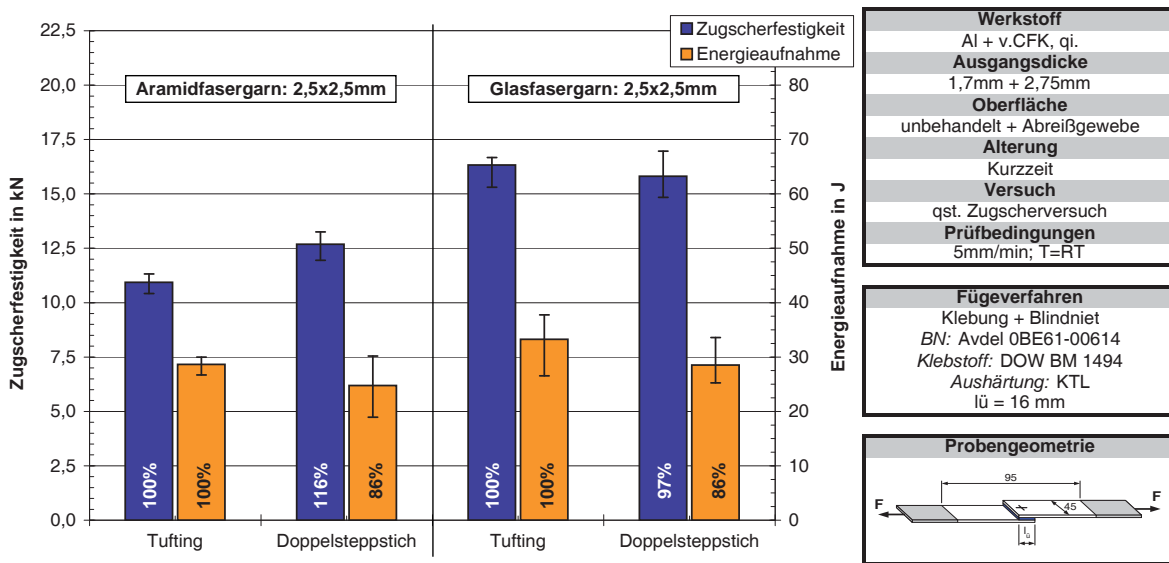


Abb. 6.14: Zugscherfestigkeiten und Energieaufnahmen getufteter und mit dem modifizierten Doppelsteppstich verstärkter Proben  
 Fügung im Karosseriebau  
**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

Die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen dem Tufting und dem Doppelsteppstich liegen im Bereich der Streuung und den Fertigungstoleranzen. Durch eine Anpassung der Maschinenparameter der Portalnähmaschine, wie z.B. der Fadenspannung zur Reduktion der Trichterbildung, kann die Nahtqualität so verbessert werden, so dass ähnliche Ergebnisse wie beim Tufting zu erwarten sind. Es sind jedoch schon jetzt bei beiden Nähverfahren dieselben Verstärkungseffekte und Tendenzen erkennbar. Somit ist ein Einfluss des Nähverfahrens auf den Verstärkungseffekt ausgeschlossen.

### 6.3.1.4 Untersuchung des Z-verstärkten FKV-Grundwerkstoffs

Um den Einfluss der Z-Verstärkung auf den FKV-Grundwerkstoff abzuschätzen, werden in-plane und out-of-plane Kennwerte des mit einem Glasfasergarn getufteten CFK-Laminats aufgenommen. Es werden Stichraster von 2,5x2,5mm und 3,5x3,5mm untersucht. Mit Ausnahme der Zugversuche zur Bestimmung der Schubkennwerte wird

hier der für die Mischverbindungen eingesetzte quasiisotrope Laminataufbau getestet. Da es sich bei dem verwendeten Gelege um eine günstige Industriefaser handelt, ist das Gelege mit sehr groben Toleranzen verarbeitet. Eine Beeinflussung der in-plane Festigkeiten im Vergleich zur unverstärkten Probe ist nicht feststellbar (Tab. 6.2, S. 149). Die Z-Verstärkung wirkt sich in geringen Rahmen negativ auf die Steifigkeit des quasiisotropen Laminats bei einem Stichraster von  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  aus.

Tab. 6.2: Einfluss der Z-Verstärkung auf die Lamineigenschaften des Grundwerkstoffs im Vergleich zum unverstärkten Laminat ( $\hat{=} 100\%$ )  
Tuftingraster:  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  und  $3,5 \times 3,5 \text{ mm}$  Glasfasergarn

	Prüfung	Laminat	Festigkeit	E-Modul	G-Modul
2, 5x2, 5mm	Zugversuch [DIN96b]	$[\pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_S$	101%	93%	-
	Zugversuch [DIN98b]	$[\pm 45^\circ]_{2S}$	102%	118%	118%
	ILSS [DIN97]	$[\pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_S$	115%	-	-
	3.-Pkt. Biegung [DIN98a]	$[\pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_S$	120%	132%	-
	Lochleibung [DIN96a]	$[\pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_S$	115%	-	-
3, 5x3, 5mm	Zugversuch [DIN96b]	$[\pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_S$	114%	101%	-
	Zugversuch [DIN98b]	$[\pm 45^\circ]_{2S}$	96%	112%	115%
	ILSS [DIN97]	$[\pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_S$	109%	-	-
	3.-Pkt. Biegung [DIN98a]	$[\pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_S$	117%	123%	-

Out-of-plane Kennwerte und Kennwerte bei denen die interlaminare Kopplung dominiert wie die Festigkeit der 3-Punkt-Biegung oder die Schubsteifigkeit verzeichnen Zuwächse von ca. 15 bis 17%. Diese Ergebnisse decken sich größtenteils mit den Erfahrungen aus der Literatur [SWH<sup>+</sup>00, FDB03, Geß01].

Zusammenfassend werden bei den verwendeten Z-Verstärkungen die out-of-plane Eigenschaften und Eigenschaften mit dominierender interlaminarer Kopplung verbessert, während eine Beeinflussung der in-plane Eigenschaften vernachlässigt werden kann.



### 6.3.2 Versuchsprogramm optimierter Proben

Für das Versuchsprogramm optimierter Proben werden die CFK-Fügepartner mittels Glasfasergarn im Fügebereich mit einem  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  Tuftingraster verstärkt.

Es wird dasselbe Versuchsprogramm für die Blindnietklebung wie in Kapitel 5.4.2 (S. 96) verwendet. Die durchgeführten Versuche sind in Tabelle 6.3 (S. 150) aufgelistet.

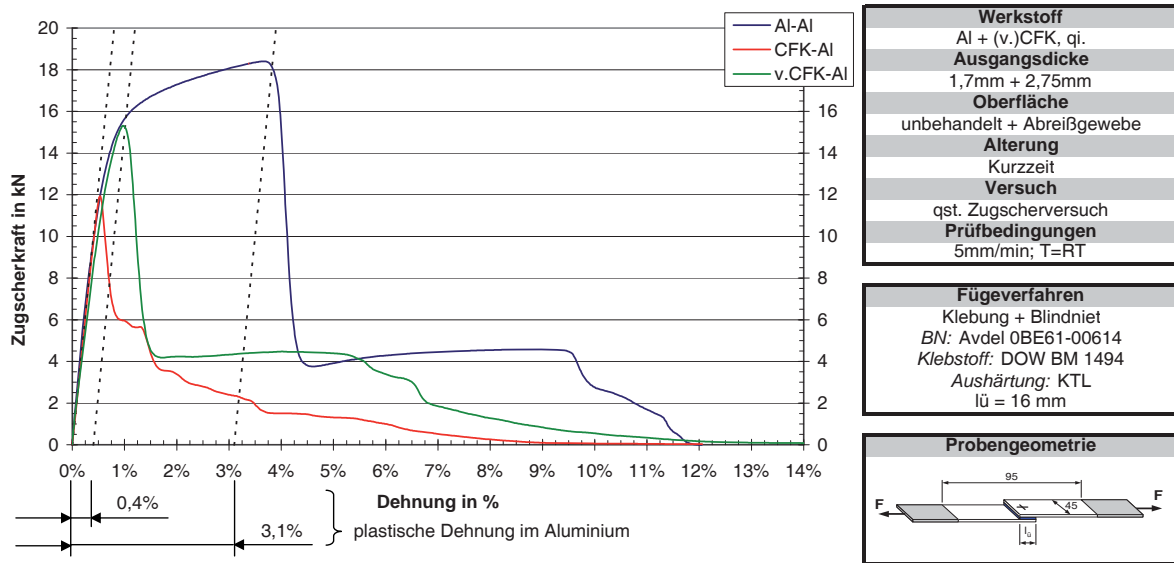
Tab. 6.3: Versuchsmatrix im Karosseriebau kombiniert gefügter Verbindungen  
CFK mit einem  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  Raster mit Glasfasergarn getuftet

		Belastung	Kurzzeit	140d KKT
BM 1494 + Blindniet	Al-AI	quasistatisch	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X
	v.CFK-AI	quasistatisch	X	X
		quasistatisch; CFK+Glasgewebe	X	X
		schlagartig	X	X
		wechselnd	X	X

#### 6.3.2.1 Quasistatische Versuche: Z-verstärkte BNK,K

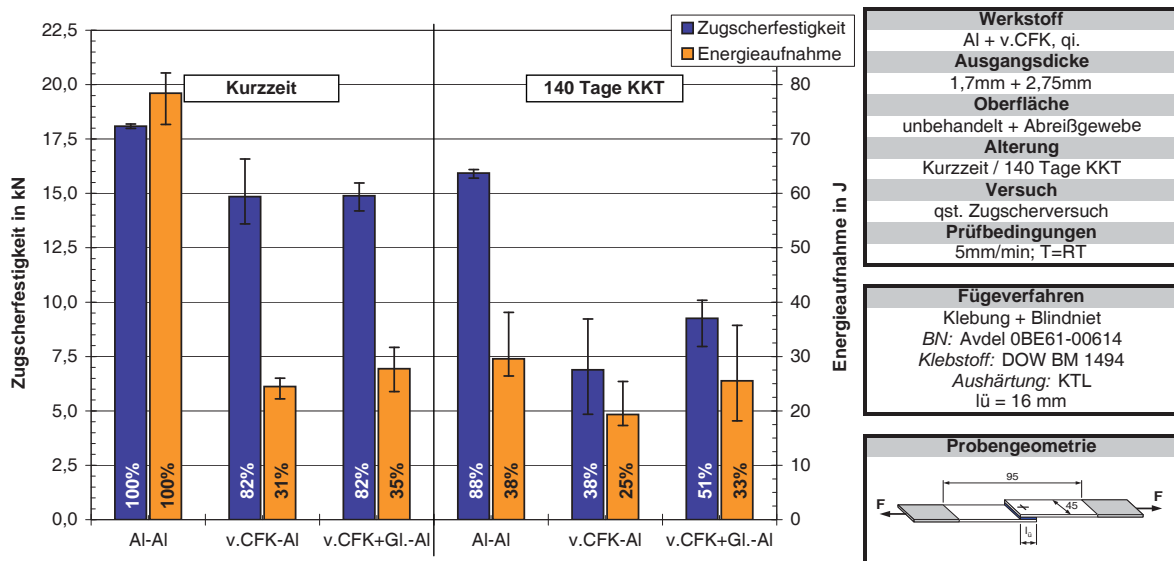
Bei Betrachtung der Kraft-Dehnungsverläufe (Abb. 6.15a, S. 151) ist der Verstärkungseffekt der Z-Verstärkung für die Zugscherprobe deutlich erkennbar. Die Tufts erhöhen die Festigkeiten der Klebung im Vergleich zur unverstärkten Mischverbindung um ca.  $3 \text{ kN}$  (Abb. 6.15b, S. 151).

Der Bereich des Plastifizierens im Al-Fügepartner wird erreicht, so dass die gesamte Verbindung plastische Dehnung von etwa  $0,4\%$  aufweist. Es ist kein Separieren der einzelnen Laminatlagen im Fügebereich erkennbar und der Faserabriss bzw. partielle



(a) Kraft-Dehnungsverläufe der unverstärkten und Z-verstärkten Blindnietklebung

**blau:** Al-Al; **rot:** CFK-Al, unverstärkt; **grün:** v.CFK-Al, 2, 5x2, 5mm Glasfasergarn getuftet



(b) Ergebnisse quasistatischer Zugscherversuche der Z-verstärkten Blindnietklebung

v.CFK mit einem 2, 5x2, 5mm Raster mit Glasfasergarn getuftet

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

Abb. 6.15: Kraft-Dehnungsverlauf und Ergebnisse quasistatischer Zugscherversuche der Z-verstärkten Blindnietklebung  
Fügung im Karosseriebau

Lagenabriss vom CFK-Laminat nach dem Versagen der Klebung wird auf wenige Fasern im Probenrandbereich reduziert (Abb. 6.11b, S. 144).

Durch die geringere Vorschädigung nach dem Versagen der Klebung und durch die Erhöhung der Lochleibungsfestigkeiten bei Vernähung ist im Gegensatz zu unverstärkten Versuchen ein ausgeprägtes sekundäres Tragverhalten zu beobachten. Ergänzende Versuche mit dem in Kapitel 5.3 (S. 82) verwendeten Stahlblindniet für die Blech- und die Mischverbindungen haben gezeigt, dass die sekundären Festigkeiten der Blindnietklebung ausreichend sind, um bei der Mischverbindung ebenfalls wie bei der Blechverbindung ein Versagen des Blindnietes hervorzurufen.

Bei den hier aufgezeigten Versuchen wird jedoch der festere Edelstahlblindniet verwendet, damit es bei den Mischverbindungen zu einem Lochleibungsversagen im CFK und bei den Blechverbindungen zu einem Ausscheren in einem der Al-Fügepartner (Abb. 5.18a, S. 103) kommt, um so den Einfluss der Verstärkung auf den CFK-Fügepartner und nicht des Fügeelement zu beobachten.

### 6.3.2.2 Hochgeschwindigkeitszugscherversuche: Z-verstärkte BNK,K

Im Vergleich zu den unverstärkten Proben liegen hier die durchschnittlichen Maximalkräfte bei den verstärkten Proben um etwa  $2,5kN$  höher, was einer Steigerung von 26% entspricht (Abb. 6.16, S.153). Trotz großer Streuung der Steifigkeiten ist deutlich zu erkennen, dass die im Fügebereich Z-verstärkten Proben eine höhere Steifigkeit aufweisen als unverstärkte Proben. Ebenso wird die Energieaufnahme um ca. 15% verbessert. Obwohl das sekundäre Tragverhalten der getufteten Proben über dem der unverstärkten Proben liegt, ist kein ausgeprägtes sekundäres Lastniveau, wie es bei den quasistatischen Versuchen beobachtet werden kann, erkennbar. Auch wenn eine Steigerung der Energieaufnahme im Vergleich zur unverstärkten Probe erreicht wurde, bleibt dieser Zuwachs in Bezug auf die äquivalente Blechverbindung relativ gering.

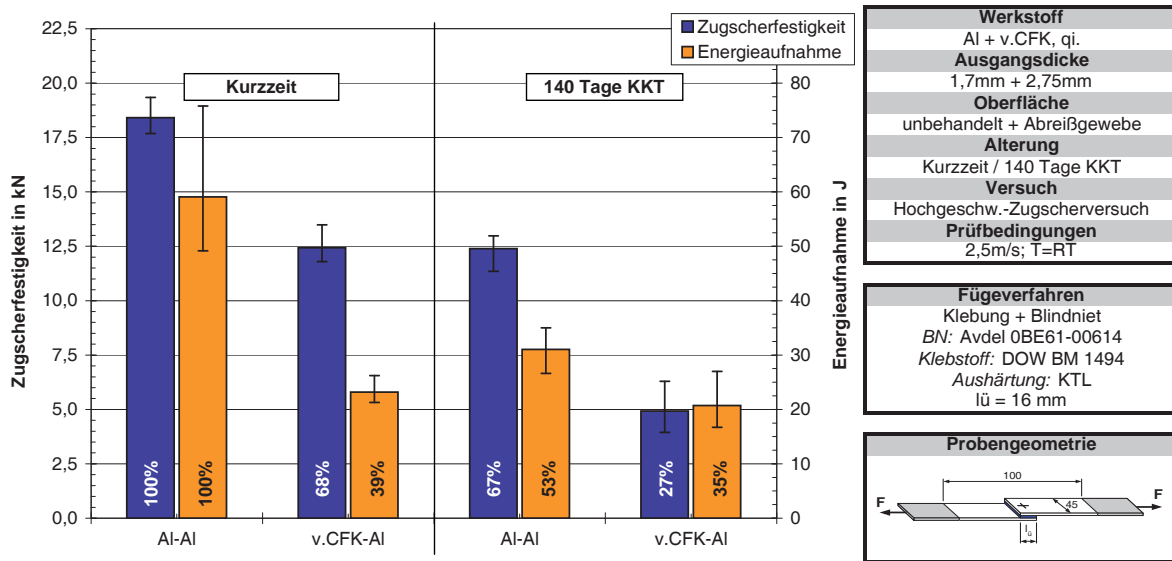


Abb. 6.16: Ergebnisse schlagartiger Zugscherbelastung der Z-verstärkten

Blindnietklebung

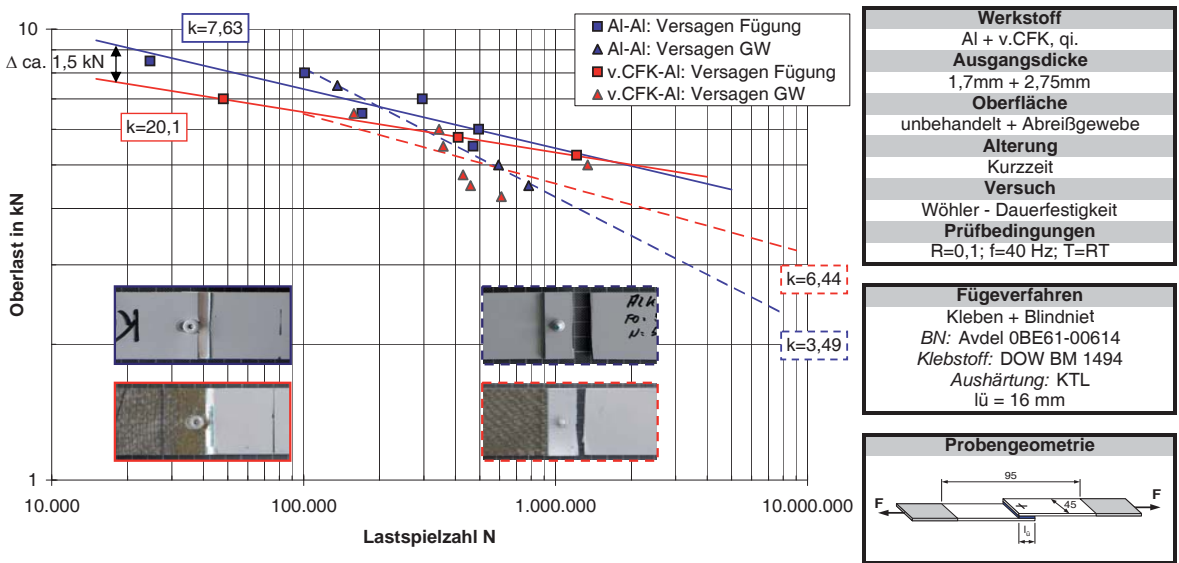
CFK mit einem  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  Raster mit Glasfasergarn getuftet (v.CFK)

Fügung im Karosseriebau

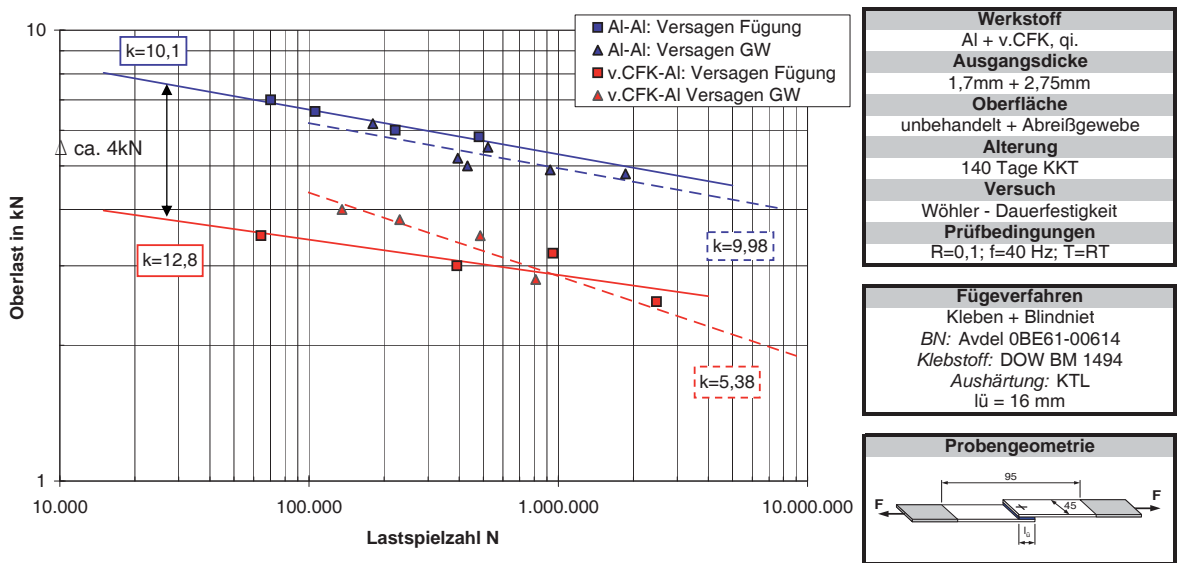
**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

### 6.3.2.3 Versuche mit wechselnder Belastung: Z-verstärkte BNK,K

Die Z-Verstärkung wirkt sich ebenfalls positiv auf die Dauerfestigkeiten der Mischverbindung im hohen Lastniveau aus (Abb. 6.17a, S. 154). Während die Oberlasten der getufteten Versuchsreihe im Bereich von 15.000 Schwingspielen leicht höher als die der unverstärkten Versuchsreihe liegen, steigt der  $k$ -Faktor für ein Versagen in der Fügung von  $k_{unverst.} = 8,5$  auf einen Wert von  $k_{Z-verst.} = 20,1$  an. Im CFK-Grundwerkstoff werden durch die Vernähung und die damit verbundene Kopplung der einzelnen Laminatlagen die Spannungen von der Klebschicht besser in das gesamte Laminat eingeleitet. Durch die homogenere Spannungsverteilung im CFK-Fügepartner weisen die Verbindungen im Bereich mit Versagen der Fügung eine wesentlich höhere Dauerschwingfestigkeit als das unverstärkte Laminat auf.



(a) Wöhlerlinien, Kurzzeit



(b) Wöhlerlinien, 140 Tage KKT

Abb. 6.17: Wöhlerlinien der Z-verstärkten Blindnietklebung

v.CFK mit einem 2,5x2,5mm Raster mit Glasfasergarn getuftet (v.CFK)

Fügung im Karosseriebau

**blau:** Al-Al; **rot:** CFK-Al

□ Versagen der Fügung; △ Versagen im Grundwerkstoff (GW)

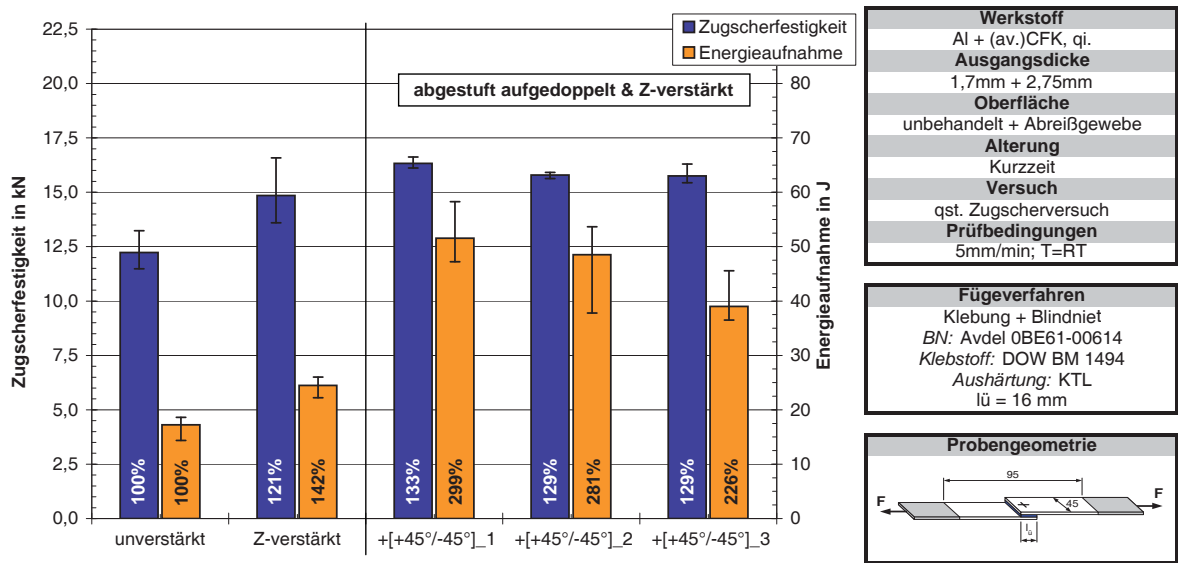
Im Bereich hoher Schwingspielzahlen hat die Vernähung keinen Einfluss, da dieser Bereich, wie bei den unverstärkten Proben, durch das Grundwerkstoffversagen im Al-Fügepartner dominiert wird. Bei den Dauerfestigkeitsversuchen gealterter Proben (Abb. 6.17b, S. 154) ist dasselbe Verhalten wie bei den unverstärkten Mischverbindungen festzustellen (Kap. 5.4.2.3, S. 106). Dieses ist ein weiteres Zeichen dafür, dass hier die Klebschichtunterwanderung aufgrund der KKT-Behandlung der bestimmende Faktor für die Dauerfestigkeiten ist. Ein Einfluss der Z-Verstärkung auf die Ergebnisse der Dauerschwingversuche gealterter Proben ist nicht feststellbar.

### 6.3.3 Kombinierte Verstärkung

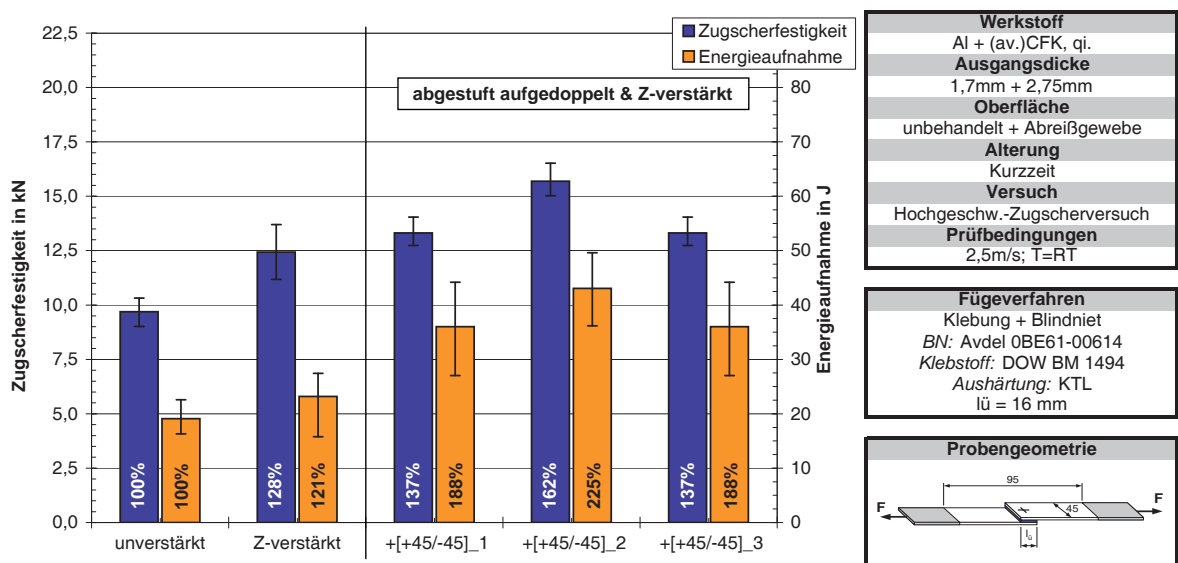
Wird die Maßnahme der Z-Verstärkung mit der in Kapitel 6.1 (S. 125) in Abbildung 6.4 (S. 131) erwähnten und untersuchten Aufdopplung des Fügebereichs kombiniert (av.CFK), so ist zu erkennen, dass ebenfalls im Vergleich zur nicht aufgedoppelten Probe sowohl bei quasistatischer wie auch bei schlagartiger Zugscherbelastung die Energieaufnahmen erheblich verbessert werden können (Abb. 6.18, S. 156).

Mit zunehmender Dicke der Aufdopplung wird im Gegensatz zu den Proben mit Aufdopplung ohne Z-Verstärkung die Energieaufnahme aufgrund des sich ändernden Versagensmechanismus des sekundären Lastniveaus geringer. Die Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit aufgrund der Aufdopplung kombiniert mit der Z-Verstärkung verhindern bei größeren Aufdopplungsdicken ein Lochleibungsversagen und führt so zu einem Ausknöpfen des Blindniets. Durch das frühzeitige schlagartige Versagen beim Ausknöpfen bei relativ geringen Dehnungen wird im sekundären Lastniveau im Gegensatz zum kontinuierlichen Prozess des Lochleibungsversagens weniger Energie absorbiert.

Die Zugscherfestigkeiten bei quasistatischer Belastung liegen bei den zusätzlich zur Aufdopplung Z-verstärkten Proben etwa in einem ähnlichen Bereich wie bei den aufgedoppelten Versuchen ohne Z-Verstärkung. Somit ist der prozentuale Festigkeitszuwachs durch die Aufdopplung bei den Z-verstärkten Proben geringer, da sich das Kraftniveau



(a) Ergebnisse quasistatischer Zugscherbelastung



(b) Ergebnisse schlagartiger Zugscherbelastung

Abb. 6.18: Ergebnisse quasistatischer und schlagartiger Zugscherbelastung der Blindnietklebung mit aufgedoppeltem und Z-verstärktem Fügebereich  
 Aufdopplung setzseitig:  $[+45^\circ / - 45^\circ]_1$ ,  $[+45^\circ / - 45^\circ]_2$  und  $[+45^\circ / - 45^\circ]_3$   
 Fügung im Karosseriebau  
**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme

der Z-Verstärkten und nicht aufgedoppelten Probe bereits auf einem hohen Niveau befindet. Aufgrund der Z-Verstärkung wird das Versagen im primären Lastniveau nicht durch die auftretenden Schälkräfte und die damit verbundenen Delaminationen zwischen den CFK-Lagen dominiert. Während bei den unverstärkten Proben bei schlagartiger Zugscherbelastung nur ein geringer Anstieg der Zugscherfestigkeiten durch die Aufdopplung zu erreichen ist, wird die Zugscherfestigkeit der zusätzlich im Fügebereich Z-verstärkten Proben im Vergleich zur unverstärkten Probe erheblich verbessert (vgl. Abb. 6.4, S. 131 und Abb. 6.18, S. 156).

Im Vergleich zur unverstärkten Probe wird bei einer Aufdopplung von zusätzlich  $[+45^\circ/-45^\circ]_1$ -Laminatlagen bereits ein großer Verstärkungseffekt erzielt. Da bei Z-verstärkten Proben bereits geringere Aufdopplungsdicken ausreichend sind, um die volle Verstärkungswirkung zu erzielen, wird bei Kombination der Verstärkungsmaßnahmen Material und Gewicht im Fügebereich gespart werden. Zusätzlich wird die Aufdopplung durch die Vernähung fixiert, was die Handhabung der Preform erheblich erleichtert.

## 6.4 Schlussfolgerungen

In Kapitel 6.1 (S. 125) werden unterschiedliche Verstärkungsmaßnahmen für die Mischverbindung beschrieben und diskutiert. Mit Hilfe ergänzender Versuchen wurde der Verstärkungseffekt einer Vergrößerung der Überlappungslänge sowie einer Aufdopplung des FKV im Fügebereich aufgezeigt. Bei Aufdopplung der Proben werden vor allem die Energieaufnahmen der Verbindung aufgrund eines verbesserten sekundären Lastniveaus erhöht. Aufgrund ihrer vielseitigen Einsetzbarkeit und der nur sehr geringen Massenzunahme wurde die Verstärkung des FKV mit Hilfe der Nähetechnik detailliert untersucht.

In den Untersuchungen (Kap. 6.3.1, S. 139) wird der Verstärkungseffekt einer Vernähung in Laminatdickenrichtung für verschiedene Verstärkungsfäden nachgewiesen.



Glasfaser- und Aramidfasergarn zeigen eine bessere Verstärkungswirkung als ein Kohlenstofffaserrowing. Mit zunehmender Stichdichte wird die Vorschädigung im Laminat nach Versagen der Klebung verringert. Es wird ein Stichraster von  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  bis  $3,5 \times 3,5 \text{ mm}$  für eine optimale Verstärkungswirkung zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften der Mischverbindungen identifiziert.

Die Stichanordnung der Z-Verstärkung (Rechteck- oder Rautenmuster) und die Positionierung des Überlappungsendes hat keinen erkennbaren Einfluss auf die verstärkende Wirkung (Kap. 6.3.1.2, S. 142). Ebenso ist ein Einfluss durch das Nähverfahrens (modifizierter Doppelsteppstich bzw. Tufting) auf die Verstärkungswirkung bei geeigneter Wahl der Nähparameter zu vernachlässigen (Kap. 6.3.1.3, S. 147).

Versuche eines mit dem Glasfasergarn mit einem Stichraster von  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  und  $3,5 \times 3,5 \text{ mm}$  getufteten FKV-Grundwerkstoff zeigen eine Erhöhung der out-of-plane Eigenschaften von bis zu 32% bei geringer bis zu vernachlässigbarer Beeinflussung der in-plane Eigenschaften (Kap. 6.3.1.4, s. 148). Zusätzlich verbessert die Z-Verstärkung die Lochleibungseigenschaften des FKV. Neben höheren Lochleibungsfestigkeiten erweist sich der Z-verstärkte FKV gegenüber Spielpassungen wesentlich toleranter als das unverstärkte Laminat (Kap., 6.3.1.2, S. 142).

Die Versuche mit optimierten Zugscherverbindungen (Kap. 6.3.2, S. 150) zeigen die positive Auswirkung einer Z-Verstärkung bei unterschiedlichen Belastungsarten. Mit einem mit Glasfasergarn mit einem Raster von  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  getufteten Fügebereich werden die Festigkeiten sowohl bei quasistatischer als auch bei schlagartiger Belastung erhöht (Tab. 6.4, S. 159). Besonders bei den quasistatischen Versuchen wird die Energieaufnahme der Mischverbindung durch ein ausgeprägtes sekundäres Lastniveau maßgeblich verbessert. Dieser Effekt ist bei den Hochgeschwindigkeitszugscherversuchen jedoch nur im Ansatz erkennbar. Bei wechselnder Belastung wirkt sich die Vernähung positiv auf die Dauerfestigkeit bei niedrigen Schwingenspielzahlen aus, während bei das Versagen bei hohen Schwingenspielzahlen durch das Versagen im Al-Fügepartner dominiert wird und somit der Verstärkungseffekt nicht zu Tragen kommt.

Tab. 6.4: Prozentualer Vergleich der Festigkeit und der Energieaufnahme der Blechverbindung, der unverstärkten und Z-verstärkten Mischverbindung referenziert auf die ungealterte Blechverbindung ( $\hat{=}$  100%); Fügung im Karosseriebau

			Festigkeit		Energieaufnahme	
			Kurzzeit	KKT	Kurzzeit	KKT
Karosseriebau	qst	Al-Al	100%	88%	100%	38%
		CFK-Al	68%	35%	22%	25%
		v.CFK-Al	82%	38%	31%	25%
	HZV	Al-Al	100%	67%	100%	53%
		CFK-Al	53%	24%	32%	28%
		v.CFK-Al	68%	27%	39%	35%

Die Z-Verstärkung mittels textiler Nähverfahren stellt somit ein einfaches und praktisches Mittel zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften von Mischverbindungen dar. Eine grundlegende Abschätzung des verstärkenden Effekts ist mit diesen Ergebnissen gegeben.

Weiter wurde gezeigt, dass die Z-Verstärkung mit der Verstärkungsmaßnahme des Aufdoppelns kombinierbar ist. So wird durch die Kombination beider Verstärkungsmaßnahmen eine weitere Verbesserung der Verbindungseigenschaften erreicht (Tab. 6.5, S. 160). Für einen ähnlichen Verstärkungseffekt werden geringere Aufdopplungsdicken wie bei Verbindungen ohne zusätzliche Z-Verstärkung benötigt. Dies gilt sowohl für quasistatische wie auch für schlagartige Belastung.

Bei einer Kombination von Aufdopplung und Z-Verstärkung besteht jedoch mit zunehmender Aufdopplungsdicke die Gefahr, dass es durch die Verstärkung zu einer Änderung im Versagensmodus kommt (vom Lochleibungsversagen zum Ausknöpfen

des mechanischen Elements). Diese insgesamt zu effiziente Verstärkung führt zu einem Versagen des Fügeelements und damit zu einer Verschlechterung der Verbindungseigenschaften. Dies gilt vor allem für die Energieaufnahme, da so das kontinuierliche Lochleibungsversagen im FKV durch ein schlagartiges Ausknöpfen und damit einen sofortigen Lastabfall ersetzt wird.

Tab. 6.5: Prozentualer Vergleich der Festigkeit und der Energieaufnahme der Blechverbindung, der aufgedoppelten und Z-verstärkten Mischverbindung sowie kombiniert verstärkten Mischverbindung referenziert auf die Blechverbindung ( $\hat{=}$  100%); Fügung im Karosseriebau

3D-Verstärkung			Festigkeit		Energieaufnahme	
			unverst.	Z-verst.	unverst.	Z-verst.
<b>Karosseriebau</b>	<b>qst</b>	Al-Al	100%		100%	
		(v.)CFK-Al	68%	82%	22%	31%
		$+[+45^\circ / - 45^\circ]_1$	63%	90%	40%	66%
		$+[+45^\circ / - 45^\circ]_2$	87%	87%	60%	62%
		$+[+45^\circ / - 45^\circ]_3$	99%	87%	82%	50%
	<b>HZV</b>	Al-Al	100%		100%	
		(v.)CFK-Al	53%	68%	24%	39%
		$+[+45^\circ / - 45^\circ]_1$	49%	72%	52%	61%
		$+[+45^\circ / - 45^\circ]_2$	57%	85%	66%	73%
		$+[+45^\circ / - 45^\circ]_3$	62%	72%	68%	71%

## 7 Numerische Simulation

Analytische Ansätze zur Vorhersage von Festigkeiten einer Klebung gehen meist von einem Versagen in der Klebschicht aus [LT07]. Die FE-Simulation geklebter Verbindungen mit FKV-Fügepartnern ist bis heute problematisch, da es meist aufgrund schwacher interlaminarer Festigkeit des FKV zu einem Versagen im Fügepartner statt in der eigentlichen Klebung kommt. Dies wird in der FKV-Simulation in der Regel nicht berücksichtigt. Häufig wird auch in der FE-Simulation ein Klebschichtversagen angenommen, da die bekannten Versagenskriterien der FKV nur eine Abschätzung, jedoch keine exakte Vorhersage vor allem für die Delamination ermöglichen. Andere Untersuchungen beschränken sich auf Vorhersagen zum Steifigkeitsverhalten der Verbindung [OLS00a, OLS00b]. Das Versagen im FKV-Fügepartner bei Zugscher- und Lochleibungsbelastung spielt sich im mikro- bis mesomechanischen Bereich ab. Bis heute existiert kein geeignetes Versagenskriterium, um dieses Versagen auf makroskopischer Ebene ausreichend abzubilden [SKN<sup>+</sup>08].

Die Z-Verstärkung des Laminats verbessert vor allem die Energiefreisetzungsraten für den Mode I (Schälung) und Mode II (Schub- bzw. Längsschub) [DJM98, JDM98], da sich die eingebrachte Z-Verstärkung positiv auf die interlaminare Festigkeit auswirkt (vgl. Kap. 6.1, S. 125). Die Energiefreisetzungsraten sind ein Werkstoffkennwert und entsprechen der Energie, die bei einer Rissverlängerung in diesem Werkstoff freigesetzt bzw. zur Rissverlängerung benötigt wird. Sie beschreibt also den Widerstand eines Werkstoffs gegen einen Rissfortschritt. Ein einfaches Anpassen der Kennwerte in

der Materialkarte für die Simulation (vgl. [VPSW07]) ist hier nicht zielführend, da so der Einfluss der Z-Verstärkung nicht lokal aufgelöst werden kann. Untersuchungen z.B. eines Stichrasters oder einer optimalen Nahtposition sind somit nicht möglich. Voraussichtlich kann zwar das globale Versuchsverhalten abgebildet werden, ein Verständnis für die verstärkenden Effekte wird jedoch nicht erreicht.

Es wird folglich ein Modell gesucht, in dem der Verstärkungseffekt durch eine Z-Verstärkung einzeln aufgelöst und nicht verschmiert dargestellt wird. Die FE-Simulation muss in der Lage sein, den Einfluss unterschiedlicher Verstärkungsparameter wie beispielsweise durch das Stichraster für eine Abschätzung vorhersagen zu können. So kann die Vernäherung bereits im Vorfeld mit geringem Aufwand optimiert werden, bevor ein aufwändiges Versuchsprogramm gestartet wird.

Um repräsentative Aussagen aus der FE-Simulation zu bekommen, müssen die komplexen Spannungszustände im Fügebereich richtig abgebildet werden. Dazu ist es nötig, die Probe zumindest in der Prüfrichtung mit den realen im Versuch getesteten Dimensionen zu modellieren. Zur Verringerung der Anzahl der finiten Elemente und damit zur Verkürzung der Berechnungszeit wird meist die Probenbreite im FE-Modell reduziert und durch entsprechende Randbedingungen in der FE-Simulation ersetzt werden. Da quasiisotrope Faserkunststoffverbunde aus unidirektionalen Lagen jedoch eine asymmetrische Biegesteifigkeit besitzen (Abb. 3.4, S. 54), geht dieses Verfahren zu Lasten einer exakten Abbildung der im Versuch real auftretenden Spannungszustände im Fügebereich. Deshalb empfiehlt es sich, alle Dimensionen der im Versuch getesteten Probe exakt in das FE-Modell zu übernehmen.

Ein Einheitszellenmodell, um auf die Eigenschaften der Z-verstärkten Probe zu schließen (vgl. [GZM02]), ist in diesem Fall aufgrund der Größe der Einheitszelle in Abhängigkeit vom Raster der Z-Verstärkung nicht möglich. Durch die benötigte Größe des FE-Modells und die daraus resultierenden Anzahl an finiten Elementen ist der benötigte Rechenaufwand bei getrennter Modellierung von Fasern und Matrix nicht

akzeptabel. Damit ist eine Abbildung der mikro- bzw. mesomechanischen Effekte mit Hilfe eines Einheitszellenmodells nicht realisierbar, so dass nur makromechanische Effekte im FE-Modell vollständig abgebildet werden können.

Implizite Berechnungen eines elastisch-plastischen Modells, berechnet mit dem MD Nastran Solver, zeigen, dass der Effekt einer Z-Verstärkung hier nicht abgebildet wird. Selbst eine besonders feine Vernetzung des Fügebereichs zeigt keinen wesentlichen Unterschied im Vergleich zur unverstärkten Probe. Hieraus ist abzuleiten, dass der Großteil des verstärkenden Effekts durch die höhere Schadenstoleranz der vernähten Proben verursacht wird, d.h. erst nach Erstschädigung des FKV bildet sich der verstärkende Effekt aus (vgl. [GZ03]). Da in den Versuchen Delaminationen als dominante Schädigungs- und Versagensursache ausgemacht werden und eine Z-Verstärkung vor allem auf mikro- und mesomechanischer Ebene das Laminat verstärkt, müssen vor allem Delaminationen im Modell des CFK-Fügepartners darstellbar sein.

Die Versuche haben gezeigt, dass das Tragverhalten der Klebung und des mechanischen Elements getrennt voneinander betrachtet werden können. Ein kombiniertes Tragverhalten von Klebschicht und mechanischem Element, wie von Kelly untersucht [Kel05], wird aufgrund des Blindnietspiels ausgeschlossen, zumal die Versuche eine direkte, nahezu unbeeinflusste Überlagerung bzw. Addition beider Tragverhalten gezeigt haben (vgl. Kap. 5.3.2, S. 86).

Ein Lochleibungsversagen ist aufgrund der mikromechanischen Effekte in der Kontaktzone des mechanischen Elements in einem makromechanischen Modell nicht ausreichend abbildbar. Mechanische Verbindungspunkte werden in makromechanischen Modellen meist mit Hilfe unterschiedlich modifizierter Feder- und Dämpferelemente dargestellt. Die Ersatzmodelle werden bezüglich ihres Versagens und ihres Nachbruchverhaltens (post-failure Verhalten) auf die entsprechende punktförmige Verbindung hin kalibriert. So ist jeweils eine Kalibration der unverstärkten und jeder unterschiedlich Z-verstärkten Verbindung für dieses Ersatzelement nötig. Da das Versagen und das

post-failure Verhalten im Ersatzelement vorgegeben sind, kann der Verstärkungseffekt nicht durch Veränderungen am Grundwerkstoff oder ein Einbringen eines verstärkenden Z-Elements dargestellt werden.

Deshalb konzentrieren sich die numerischen Untersuchungen in dieser Arbeit auf den Verstärkungseffekt für die elementare Klebverbindung. Versuche elementarer Klebungen zeigen bereits deutlich einen Verstärkungseffekt durch die Z-Verstärkung. Da es sich beim Versagen der Klebung um ein schlagartiges Versagen handelt, spielt das post-failure Verhalten der Klebung im Vergleich zum Lochleibungsversagen eines mechanischen Elements eine untergeordnete Rolle. Zur Verifikation der Modelle wird eine mit einem  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  Raster mit dem  $34\text{tex}$  Glasfasergarn getuftete Probe aufgebaut und simuliert.

## 7.1 Modellierung der Fügung

Für ein besseres Verständnis der in den Versuchen auftretenden Phänomene und zur Abschätzung des Verstärkungseffekts werden numerische Simulationen der Zugscherverbindung mit der von der ESI Group bereitgestellten Software PAM-Crash aufgebaut und explizit gelöst.

### 7.1.1 Grundmodell

Für das Grundmodell ist es wichtig, dass Delaminationen im FKV abgebildet werden können. Klassischerweise werden Delaminationselemente anhand von doppelten Kragbalken (double cantilever beam - DCB) Versuchen verifiziert. Erschwerend für den hier vorliegenden Fall ist, dass bei den komplexen Spannungszuständen der einfachen Überlappungsklebung die Elemente nicht so ideal wie im DCB-Test belastet werden und die damit Risspfade nicht eindeutig bekannt sind. So muss für jeden Lagenübergang im La-

minat ein eigenes Delaminationselement modelliert werden (Abb. 7.1b, S. 165). Dazu wird das sogenannte Grenzflächen-Konzept (Interface-Konzept) verwendet [CTG07].

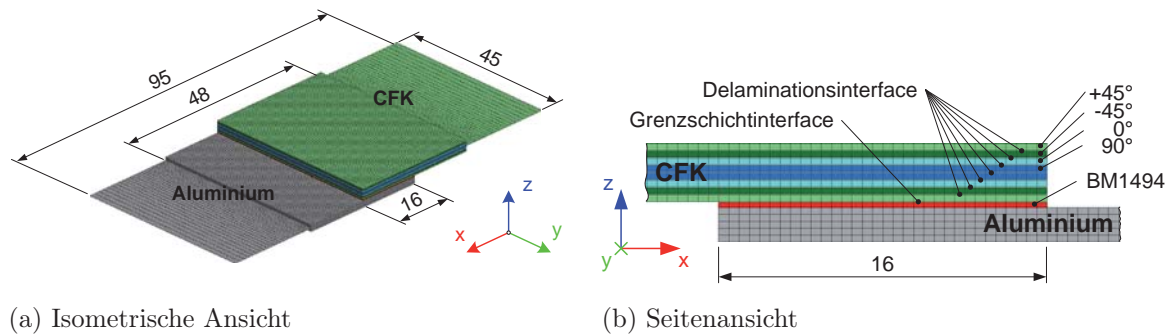


Abb. 7.1: Aufbau des Grundmodells zu FE-Simulation

Jede einzelne Laminatlage wird mit einer einzelnen Ebene von Volumenelementen (Solids) mit einem Abstand von  $0,05\text{mm}$  und ein zweiphasiges Materialmodell (Bi-Phase, PAM-Crash Typ 30) abgebildet. Die einzelnen FKV-Lagen werden mittels tied connection interface Elementen (Tied, PAM-Crash Typ 303) gekoppelt [PG05, Gre05]. Tied Elemente sind in der Lage Schädigungen und Versagen aufgrund einer Kombination aus Zug- bzw. Schäl- und Schubbelastungen abzubilden. Durch die Kombination des Bi-Phase Materialmodells mit den Tied Elementen ist das FEM-Modell des FKV in der Lage nicht nur lageninterne Schädigungen und lageninternes Versagen (d.h. im Bi-Phase Solid Element) zu berücksichtigen, sondern auch Risse zwischen den Lagen und damit Delaminationen abzubilden. Dies ist als besonders wichtig einzuordnen, da das Versagen der einschnittigen Verbindung durch Delaminationen initiiert und dominiert wird.

Nach einer Kalibrierung des Materialmodells für eine Einzellage wird der FKV mit unterschiedlichen Lagenaufbauten modelliert und mit Hilfe der Grundwerkstoffversuche validiert. So werden für den unverstärkten Grundwerkstoff Abweichungen zwischen den Versuchs- und den Simulationsergebnissen für die einzelnen Materialkennwerte wie Steifigkeit, Festigkeit und Bruchdehnung unter 5% erreicht.



Zur Modellierung des Al-Fügepartners und der Klebschicht werden Solid Elemente und ein elastisch-plastisches Materialmodell (PAM-Crash Typ 1) verwendet. Die Kalibrierung des Materialmodells für die verwendete Aluminiumlegierung erfolgt mit Hilfe von Versuchsergebnissen, während die Eigenschaften der Klebschicht (Betamate 1494) zusätzlich mit Ergebnissen aus der Literatur für den verwandten Klebstoff Betamate 1496 abgeglichen werden [GA07, Ax04].

Da bei den Versuchen ein Mischversagen bestehend aus FKV internen Delaminationen und aus einem Versagen der äußeren Harzschicht des Laminats bzw. einem Versagen der Klebschichtgrenzfläche am Laminat beobachtet wird, wird die mit Solid Elementen modellierte Klebschicht mittels der Tied Elemente an die Solid Elemente der unteren CFK-Schicht angebunden. Für die Materialkennwerte der Tied Elemente in der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Laminat erfolgt eine gesonderte Anpassung. Die Kennwerte in der Materialkarte werden anteilig aus den Klebstoffkennwerten und den interlaminaeren Kennwerten des FKV zusammengesetzt.

Um die Berechnungszeit gering zu halten, wird nur der Fügebereich ( $l_{\ddot{u}} + 2 \cdot 16mm = 48mm$ ) fein vernetzt (Abb. 7.1a, S. 165). Da die Verformungen außerhalb dieses Bereichs klein sind und dort keine Schädigung auftritt, werden außerhalb des Fügebereichs die Solid Elemente durch einfache Schalenelemente (Shells) ersetzt, die zur Einspannung bzw. Krafteinleitung hin in X-Richtung linear größer werden. Die Materialkarten werden kalibriert und mit den Versuchsergebnissen validiert.

### 7.1.2 Modellierung der Z-Verstärkung

Für die Modellierung der Vernähung bzw. der Tufts werden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt. Für die Materialeigenschaften der sich nach der Aushärtung im FKV befindlichen Tufts, also des in die Matrix eingebetteten Glasfasergarns, werden in beiden Modellierungsansätzen die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten aus den entsprechenden Datenblättern der Hersteller entnommen. Die Herleitung

und Festlegung der Materialeigenschaften kann nur theoretisch mit Hilfe der KLT erfolgen. Eine experimentelle Bestimmung der Materialeigenschaften des eingebetteten und getränkten Glasgarns isoliert vom Grundmaterial ist versuchstechnisch nicht möglich, so dass für Materialkarten der beiden hier verfolgten Modellierungsansätze die im Folgenden beschriebenen Annahmen getroffen werden.

Der Schwerpunkt wird hierbei auf das Materialverhalten der Tufts vor dem Versagen gesetzt, da das Versagen der zu simulierenden Verbindung, wie in den Versuchen erkennbar, durch das interlaminaire Versagen des FKV und nicht durch ein Versagen der Tufts initiiert und getrieben wird. Für die Festlegung der Materialeigenschaften für die finiten Verstärkungselemente ist dabei darauf zu achten, dass das finite Verstärkungselement im Laminat das doppelt liegende Glasfasergarn für den im Durchstich vor- und zurücklaufenden Faden berücksichtigt.

Bei der ersten gewählten Modellierungsvariante werden die Verstärkungsfäden durch elastisch-plastische Balkenelemente (Beams, PAM-Crash Typ 212) dargestellt. Die Balkenelemente werden in einem Raster von  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  in den Elementecken positioniert und gehen über die Lagen (d.h. entlang der Elementkanten der Solid Elemente der Einzellagen) und von Lage zu Lage (d.h. parallel zu den Tied Elementen), um die Delaminationseigenschaften zu verbessern (Abb. 7.2a, S. 167). Somit besteht ein Durchstichpunkt der Naht aus 15 einzelnen Balkenelementen. Durch das für die Balkenelemente

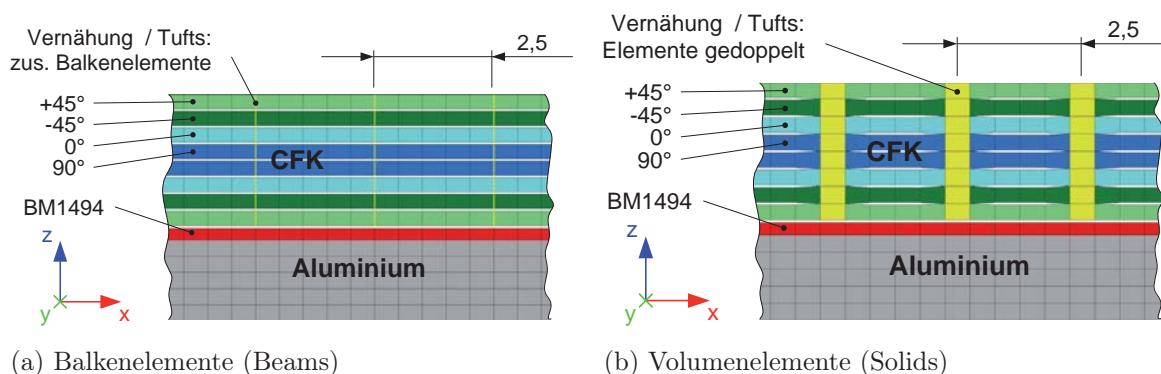


Abb. 7.2: Unterschiedliche Modellierungen für die Z-Verstärkung im Fügebereich

der Z-Verstärkung verwendete Materialmodell 212 weisen die Tuftelemente bis zu ihrer Versagensspannung von  $2,4\text{GPa}$  ein linear elastisches Verhalten auf. Nach Erreichen der Versagensspannung wird das Tangentenmodul im Vergleich zum anfänglichen Steifigkeit ( $E$ -Modul) stark herabgesetzt, so dass dieses Ersatzmodell für die Tufts nahezu keinen plastischen Bereich aufweist und die Balkenelemente als ideal linear elastisch bezeichnet werden können. Simulationen anhand von Minimalmodellen bestätigen die Ergebnisse der Literatur [Pic02, DMG<sup>+</sup>07], die besagen, dass ein Verstärkungsfaden durch ein einfaches zylindrisches Balkenelement in einem FE-Modell ausreichend repräsentiert wird.

In der zweiten Modellierungsvariante wird das unverstärkte Laminat modifiziert und durch zusätzliche Volumenelemente verstärkt. Dieses Verfahren stützt sich auf Havars Untersuchung [Hav07] von Z-verstärkten Faserverbundschlaufen. Dazu werden im CFK-Laminat die Delaminationselemente im Raster von  $2,5 \times 2,5\text{mm}$  entfernt und die Knoten der Volumenelemente in der Mitte zwischen den Lagen zusammengezogen, da die Nähfäden nicht durch eine Harzschicht unterbrochen werden (Abb. 7.2b, S. 167). Anschließend werden diesen Elementen Volumenelemente mit gleicher Geometrie und Position überlagert, so dass beide Elemente dieselben Knoten verwenden. Den neu erstellten Volumenelementen wird ein Bi-Phase Materialmodell mit der Orientierung in Z-Richtung zugewiesen. Die Materialeigenschaften für das Bi-Phase Materialmodell werden aufgrund der Annahme bestimmt, dass sich in diesem Element neben dem Harz zweimal das Glasfasergarn für den in der Naht vor und zurück laufenden Faden befindet. Dieses führt für ein quadratisches Element mit einer Kantenlänge von  $0,5\text{mm}$  zu einem Faservolumenanteil von  $\varphi = 31,4\%$ . Somit wird ein Verstärkungsfaden durch eine Kette aus einzelnen Volumenelementen abgebildet. Zur Reduktion der Rechenzeit werden uniformly underintegrated Solids mit nur einem Integrationspunkt im Elementschwerpunkt verwendet.

Der Vergleich der FEM-Ergebnisse mit der analytischen Lösung für einen einzelnen Verstärkungsfaden zeigt, dass die Zugeigenschaften durch beide Ersatzmodelle abge-

bildet werden. Die Biege- und Schubeigenschaften der einzelnen Verstärkung können jedoch im Gegensatz zu den Balkenelementen mit den Volumenelementen aufgrund des einzelnen Integrationspunkts pro Element nicht abgebildet werden [Joc09]. Im Gegensatz zur Nahtmodellierung mit den Balkenelementen ermöglicht die Verwendung des Bi-Phase Materialmodells die realitätsnähere Abbildung der Schädigungs- und Versagensmechanismen eines Faserverbunds für die Z-Verstärkung.

Ergänzend werden Modelle aufgebaut, in denen die Nahtbahn, die senkrecht zur Prüfrichtung in der Klebfläche liegt, ebenfalls mit den entsprechenden Verstärkungselementen (Beams bzw. Soldis) modelliert wird. Da der Verstärkungsfaden hier nur einfach vorhanden ist, wird der Querschnitt der Balkenelemente bzw. der Faservolumenanteil für die Volumenelemente angepasst.

Da in beiden Modellierungsansätzen jeweils nur zusätzliche Elemente in den FKV eingebracht und keine negativen Effekte wie beispielsweise eine erhöhte Faserondulation oder -schädigung im FKV implementiert werden, wird eine Beeinflussung der in-plane Eigenschaften durch die Vernähung in der Simulation vernachlässigt. Diese vereinfachende Annahme wird durch die Versuchsergebnisse für den CFK-Grundwerkstoff gerechtfertigt (Kap. 6.3.1.4, S. 148).

## 7.2 Ergebnisse der Simulation

Die Simulationen der elementar geklebten Zugscherverbindung zeigen sehr gute Übereinstimmungen mit den im Versuch in der Realität auftretenden Bruchbildern (vgl. Abb. 6.1, S. 124, Abb. 6.12, S. 145 und Abb. 7.3, S. 170). Bei der unverstärkten Probe sind nach einem lokal begrenzten Anriss des Grenzschichtinterfaces zwischen dem CFK-Laminat und der Klebschicht großflächige Delaminationen zwischen der ersten und zweiten sowie der zweiten und dritten Laminatlage des FKV ausgehend vom Überlappungsende des Al-Fügepartners sowie eine Delamination der ersten Laminatlage aus-

gehend vom Überlappungsende des CFK-Fügepartners festzustellen (Abb.7.3b, S.170). Anschließend kommt es zu einem Versagen in den unteren Lagen, so dass nach dem Trennen der Fügepartner Teile der unteren zwei CFK-Lagen auf dem Al-Fügepartner zurückbleiben.

Die Simulationsergebnisse der Z-verstärkten Proben zeigen, dass eine Modellierung der Tufts mittels Balken- und Volumenelementen möglich ist. Beide Modellierungen zeigen den gleichen verstärkenden Effekt und bilden die Realität sehr gut nach.

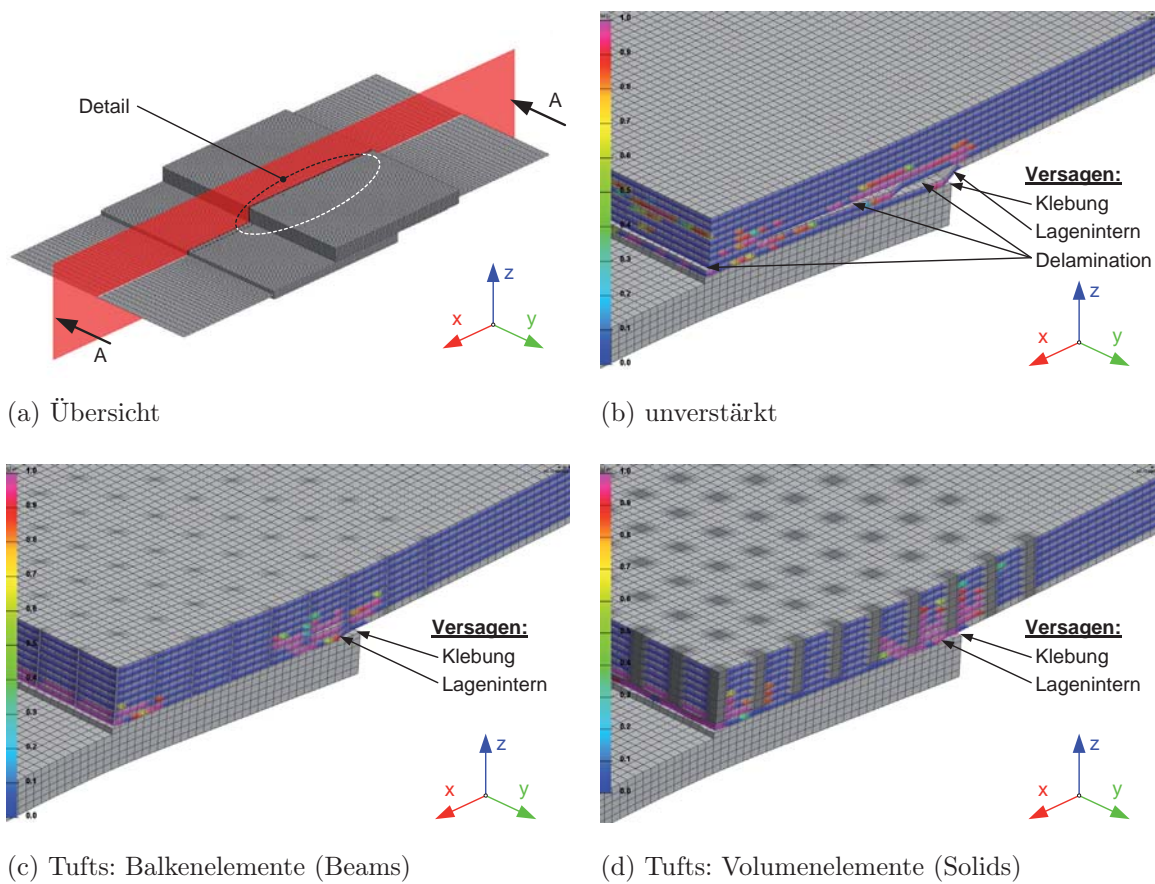


Abb. 7.3: Simulationsergebnisse der FEM-Modelle direkt vor dem Totalversagen der Verbindung der Separation der Fügepartner  
 Schnittebene: Probenmitte und || zur Zugrichtung  
 Tied Elemente: Normal Damage - Darstellung: Node (smeared)

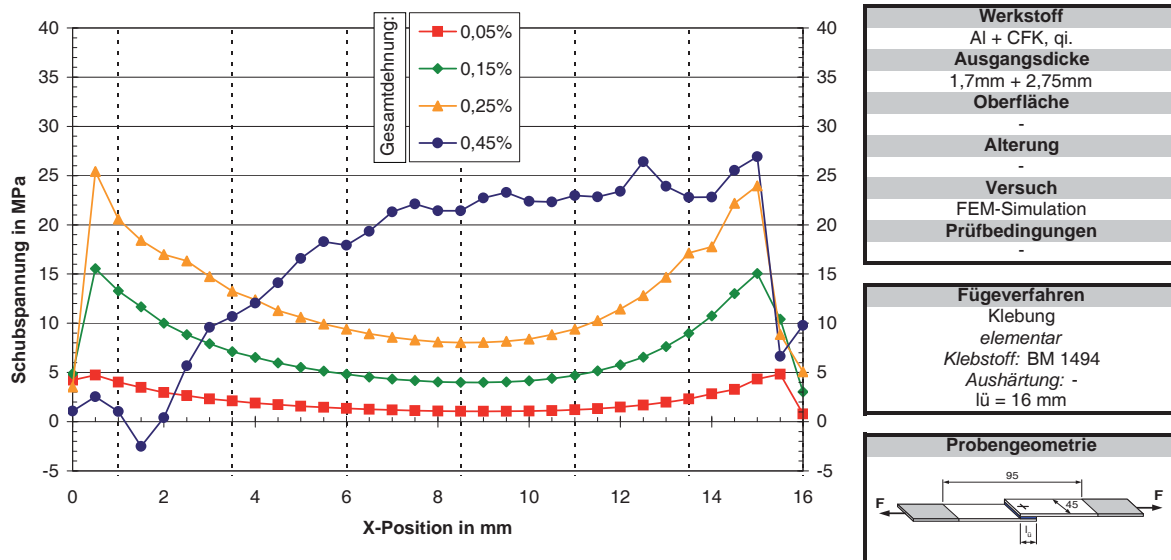
Dieses zeigt, dass der Verstärkungseffekt hauptsächlich auf einer Verbesserung der Schäl- und Schubfestigkeiten im FKV beruht, da die mit Volumenelementen modellierte Z-Verstärkung die Schub- und Biegeeigenschaften des Verstärkungsfadens nicht abbilden kann (vgl. Kap. 7.1.2, S. 166). Die Verstärkungseffekte sind bereits bei den FE-Simulationen ohne Modellierung der senkrecht zur Prüfrichtung in der Klebfläche liegenden Nahtbahn erkennbar. Mit Modellierung dieser Nahtbahn werden die Effekte jedoch deutlicher und stimmen besser mit den Versuchsergebnissen überein. Durch die quer eingebrachte Nahtbahn hat die Z-Verstärkung einen größeren Einflussbereich, da so nicht nur die sich direkt am Nahtpunkt befindenden Elemente sondern auch die weiter entfernten Elemente zwischen den senkrechten Nähtpunkten gestützt werden.

Bei den Z-verstärkten Proben kommt es nach einem Klebschichtanriss im Vergleich zur Simulation mit dem unverstärkten FKV nur zu lokal begrenzten Schädigung des FKM durch Delaminationen (Abb. 7.3c u. 7.3d, S. 170). Das Laminat bleibt wesentlich kompakter, da die Vernähung vor allem durch Aufnahme der Schälkräfte großflächige Delaminationen verhindert, so dass im Grenzschnittinterface der Klebschicht weiterhin Kraft übertragen werden kann.

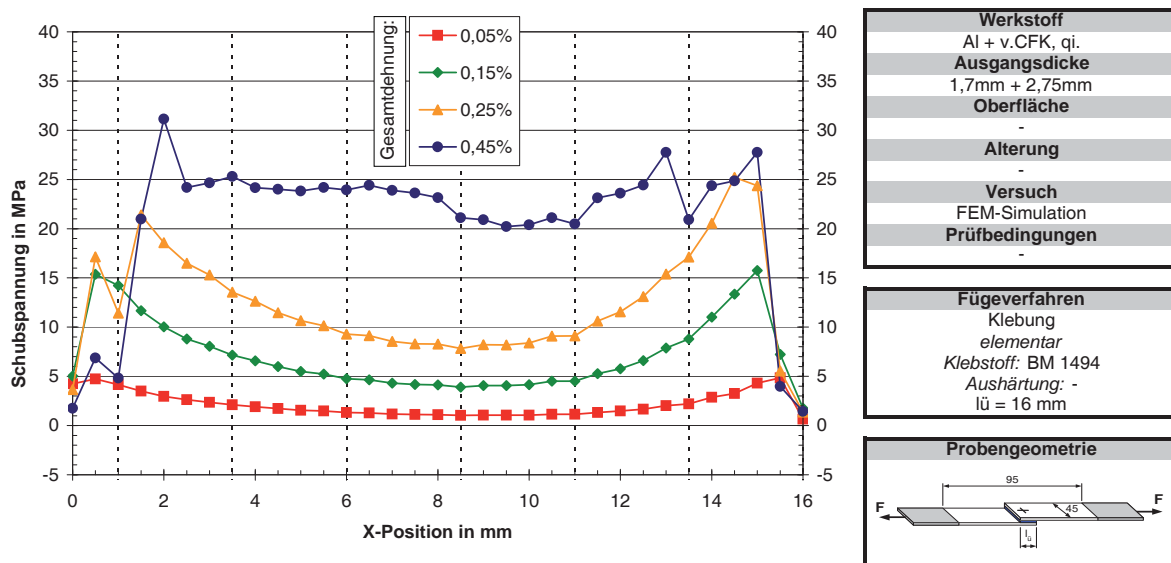
So treten auch bei den Z-verstärkten Proben interlaminare Schädigungen bzw. ein lokal beschränktes Versagen in der unteren CFK-Lage auf. Die Schädigung ist durch die rissstoppende Wirkung der Z-Verstärkung lokal stark begrenzt und führt zu keinem Versagen durch einen Lagenabriss.

Werden die Schäl- und Schubspannungsverläufe (Abb. 7.4, S. 172 und Abb. 7.5, S. 173) im Grenzschnittinterface im Schnitt A-A (Abb. 7.3a, S. 170) im Grenzschnittinterface als Indikator für die Schädigung und die übertragene Last herangezogen, ist zu erkennen, dass die Z-Verstärkung erst bei höheren Gesamtdehnungen, d.h. bei höheren Lasten, sich auf die Spannungsverläufe auswirkt.

Durch die Z-Verstärkung werden die Spannungen in andere Lagen umgeleitet. Es kommt zu einem Stützen des geschädigten Bereichs, was im weiteren Verlauf der Si-

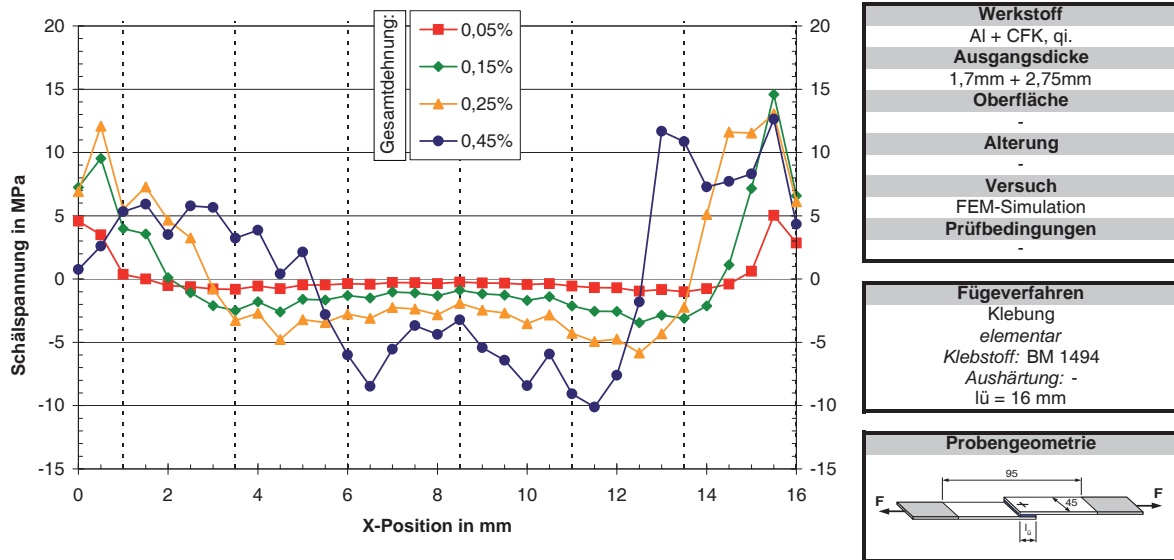


(a) unverstärktes Modell

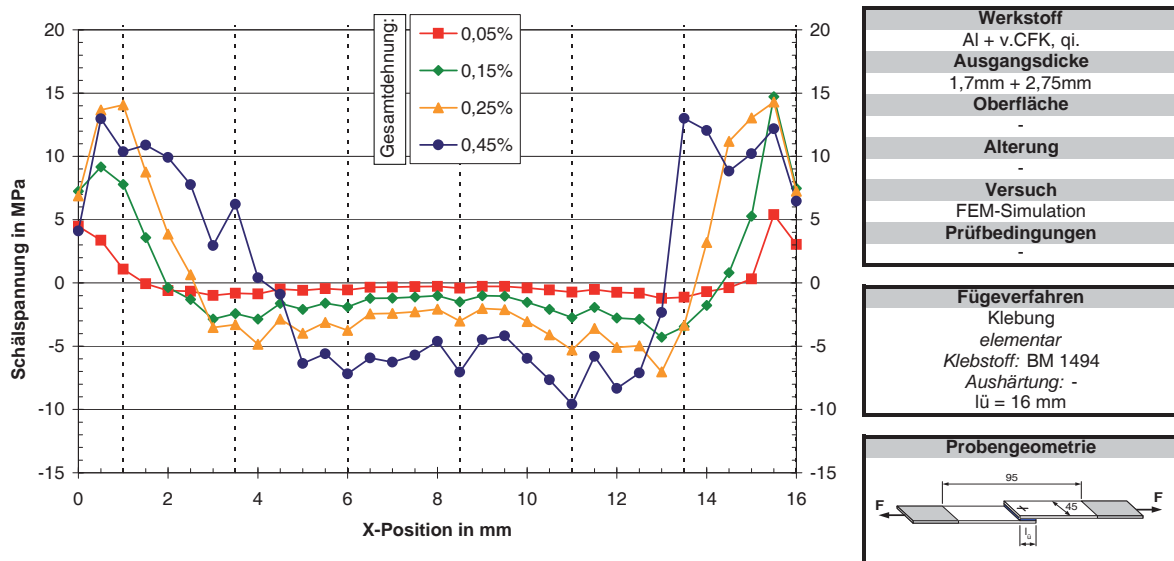


(b) Tufts: Balken-Modell

Abb. 7.4: Schubspannungsverläufe im Grenzschichtinterface in der Mitte des FE-Modells bei unterschiedlicher Gesamtdehnung



(a) unverstärktes Modell



(b) Tufts: Balken-Modell

Abb. 7.5: Schälspannungsverläufe im Grenzschichtinterface in der Mitte des FE-Modells bei unterschiedlicher Gesamtdehnung



mulation zu einem vollständigen Versagen im Grenzschichtinterface, aber keinem Lagenabriss führt. Der Verstärkungseffekt wird somit erst bei größeren Globaldehnungen und somit nach Versagensbeginn erkennbar. Dies wird ebenfalls durch Ergebnisse der elastisch-plastischen Simulation mit dem MD Nastran Solver, den Erfahrungswerten aus den Versuchen und der Literatur bestätigt [GZ03].

Die Kraft-Dehnungsverläufe des Gesamtmodells zeigen bei beiden Modellierungsarten für die Z-Verstärkung einen annähernd identischen Verlauf, so dass diese Modelle als gleichwertig zu betrachten sind (Abb. 7.6, S. 174). Durch den gezackten Kurvenverlauf ist ebenfalls erkennbar, dass der verstärkende Effekt der Tufts sich erst nach Schädigungsbeginn einstellt, so dass die verstärkten Proben eine höhere Bruchdehnung als die unverstärkten Proben aufweisen.

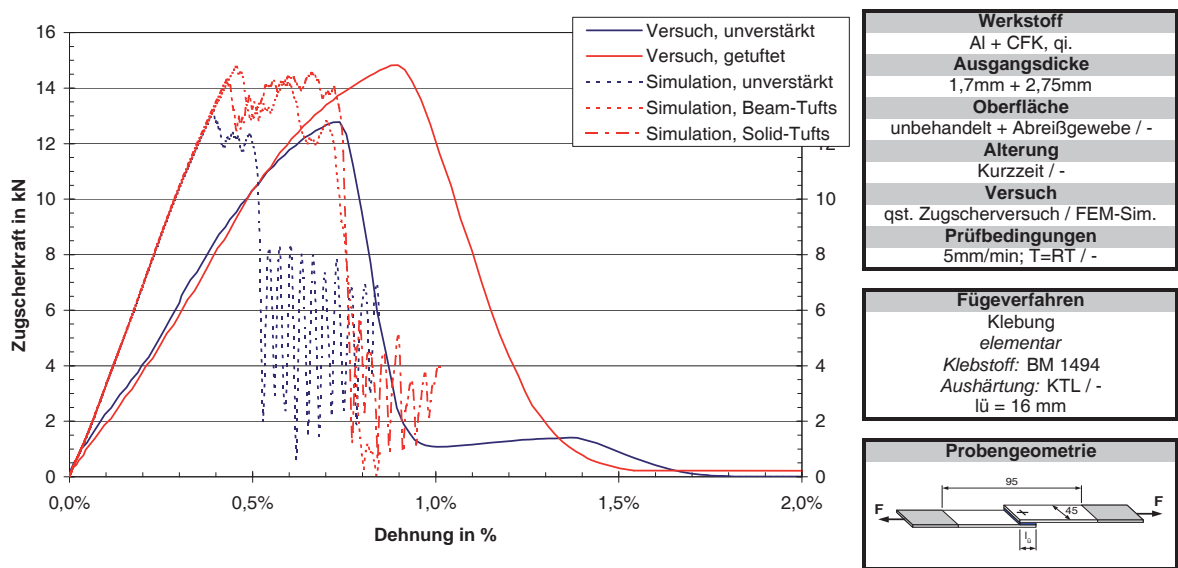


Abb. 7.6: Vergleich der Kraft-Dehnungsverläufe zwischen FE-Simulation und Versuch  
Fügung im Karosseriebau

**blau:** unverstärkt; **rot:** 2, 5x2, 5mm Glasfasergarn getuftet

Beim Vergleich der Kraft-Dehnungsverläufe aus den FE-Simulationen und den Versuchen ist zu erkennen, dass die Maximalkräfte sowohl für die unverstärkten als auch für die verstärkten Zugscherversuche nahezu übereinstimmen (Abb. 7.6, S. 174).

Bei Betrachtung der globalen Dehnung über die gesamte Probe fällt auf, dass die in der FE-Simulation berechneten Kurvenverläufe steifer als die in den Versuchen ermittelten Werte sind, obwohl nach sorgfältiger Kalibrierung die Materialkarten für die FE-Simulationen im Vorfeld eine gut Übereinstimmung der Steifigkeiten für der Einzelkomponenten, d.h. die Grundwerkstoffe zwischen Versuch und Simulation gezeigt haben. Eine lineare Skalierung der in der Simulation berechneten Dehnungen zeigt jedoch, dass abgesehen von der linearen Stauchung der Simulationskurven die Simulation und die Versuche einen nahezu identischen Kraft-Dehnungsverlauf besitzen. Das charakteristische Verhalten von Versuch und Simulation ist als identisch zu bezeichnen.

Für eine genauere Validierung der FE-Simulation mit den Versuchsdaten ist eine weitere Untersuchung nötig, in der die einzelnen im FE-Modell gemachten Vereinfachungen analysiert werden. Mögliche Einflussfaktoren für die Steifigkeitsabweichungen sind:

- Ungenauigkeiten in der Kalibrierung der Materialkarten
- Reduktion der in-plane Eigenschaften durch die Z-Verstärkung
- Beschränkungen der Materialmodelle (keine detaillierte Abbildung der mikro- und mesomechanischen Effekte)
- Steifigkeit der Prüfmaschine bzw. der Parallelführung bei exzentrischer Last
- Veränderung der freien Weglänge durch Dehnung innerhalb der Einspannung
- Einfluss der Aufdoppler zum Ausgleich des Versatzes in der Einspannung

Bei der durchgeführten FE-Simulation sind die genannten Einflussfaktoren einzeln betrachtet als vernachlässigbar zu betrachten. Somit ist die Abweichung zwischen Simulation und Versuch nur durch eine Kombination mehrerer Faktoren erklärbar. Für eine Vorauslegung und zum Verständnis der auftretenden Effekte sind diese Ergebnisse jedoch ausreichend, da alle wichtigen Phänomene von beiden Modellierungsvarianten für die Z-Verstärkung richtig abgebildet werden.

Da beide Modellierungsverfahren (Darstellung der Verstärkung mittels Balken- bzw. Volumenelementen) nahezu die gleichen Ergebnisse zeigen, ist keines der beiden Verfahren eindeutig zu bevorzugen. Während die Modellierung der Verstärkungsfäden mit Hilfe der Volumenelemente die Biege- und Schubeigenschaften der Verstärkung nicht genau abbilden kann, ermöglichen die Volumenelemente durch die Verwendung des Bi-Phase Materialmodells die Modellierung der Z-Verstärkung als Faserverbund und somit eine richtige Beschreibung der Material-, Schädigungs- und Versagenseigenschaften des Verstärkungselements. Abhilfe zur Darstellung der Biege- und Schubeigenschaften der Z-Verstärkung kann die Verwendung von Solid Elementen höherer Ordnung mit mehr Integrationspunkten zu Lasten der Berechnungszeit schaffen.

Im Gegensatz dazu können bei der Modellierung der Z-Verstärkung durch Balkenelemente aufgrund des gewählten Elementtyps nur verschmierte Ersatzkennwerte für die Materialeigenschaften, das Schädigungs- und Schadensverhalten verwendet werden. Dafür aber werden durch die in Reihe geschalteten Balkenelemente die Biege- und Schubeigenschaften der Verstärkung realitätsnah abgebildet.

Da die Modellierung mit Hilfe der Volumenelemente die Verstärkungseigenschaften über die Größe eines Elements verschmiert, sind bei gröberen FE-Netzen die Balkenelemente zu bevorzugen, um so den lokal beschränkten Effekt der Verstärkung besser abbilden zu können.

### 7.3 Optimierung mit Hilfe der Simulation

Da es gelungen ist, den Verstärkungseffekt der Z-Verstärkung durch das FE-Modell in guter Qualität abzubilden, kann eine erste Optimierung mit Hilfe der numerischen Modelle durchgeführt werden. Die Spannungsverläufe im Grenzschnittinterface (Abb. 7.4, S. 172 und Abb. 7.5, S. 173) und zwischen den Laminatlagen deuten darauf hin, dass die Nahtbahnen in der Mitte des Überlappungsbereichs wenig zum Verstärkungseffekt

beitragen. Vor allem die Nahtbahnen am Überlappungsende sind hoch beansprucht und erzeugen so den wesentlichen Anteil des Verstärkungseffekts, so dass hier ein engeres Raster gewählt werden sollte. Ebenso kann voraussichtlich der Stichabstand bzw. der Abstand Nahtbahnen senkrecht zur Prüfrichtung vergrößert werden, da das Laminat in dieser Richtung zwischen den Z-Verstärkungen zusätzlich durch die Nahtbahn auf der Laminatoberfläche gestützt wird.

Erste Optimierungen durch die Variation der Z-Verstärkung im FE-Modell zeigen, dass beispielsweise eine Reduktion der 9 äquidistanten Nahtbahnen auf 5 Nahtbahnen im Randbereich bei gleichem Nahtraster keine wesentlichen Festigkeits- oder Energieaufnahmeverluste verursacht [Joc09].

Eine detaillierte Optimierung kann somit folgen. Es ist jedoch zu beachten, dass durch die Modellierung der Verstärkungsfäden zusätzliches Material in das Laminat eingebracht wird. Hier existieren technische Grenzen wie z.B. minimale Stichrasterabstände, die im FE-Modell nicht abgebildet werden. Ebenso bildet die Vernähung im FE-Modell keine Effekte ab, die sich negativ auf die Lamineigenschaften auswirken. Solche negativen Effekte sind z.B. eine Verletzung der Fasern durch den Nähprozess oder eine erhöhte Faserondulation durch das Einbringen der Verstärkungsfasern sowie die daraus resultierenden Harznester.

Bei Berücksichtigung dieser Randbedingungen ist mit dem hier entwickelten FE-Modell eine einfache und effiziente Optimierung der Verbindungseigenschaften und so eine Verringerung des Versuchsaufwands möglich.

## 8 Wissensbasiertes Werkzeug zur Vorauslegung

Um die gewonnenen Ergebnisse für einen Anwender wie z.B. einen Konstrukteur verfügbar zu machen, können sie in die bekannten Datenbanken der Konstruktionskataloge des VDI und der Fügstellenanalyse der Audi AG eingepflegt werden (vgl. Kap 2.2, S. 36). Für beide Verfahren muss für die Erfassung einer Verbindungskonfiguration eine größere Anzahl verschiedener Versuchsergebnisse und Kennwerte bei unterschiedlichen Randbedingungen in den Datenbanken enthalten sein. Diese existiert auch bei den klassischen Metallverbindungen aufgrund der Vielzahl der möglichen und zu prüfenden Einflussgrößen nur bedingt und ist für neue Verbindungskonfigurationen wie beispielsweise CFK-AL-Mischverbindungen meist nicht annähernd ausreichend. Die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse bieten trotz der umfangreichen Versuche maximal eine Grundlage für diese beiden datenbankgestützten Verfahren.

Problematisch bleibt die Formulierung der Anforderungen und Auswahlkriterien, nach denen eine Verbindungskonfiguration ausgewählt werden soll. Meist sind die Anforderungen nicht eindeutig erfassbar. Dadurch werden die Konstruktionskataloge des VDI und die Fügstellenanalyse der Audi AG stark eingeschränkt, da nur exakte Kennwerte eingegeben und mit der Datenbank verglichen werden können. Eine intuitive Herangehensweise ist nicht möglich. Sind zu wenige Auswahlkriterien bekannt, werden zu viele, auch ungeeignete Verfahren vorgeschlagen.

Bei starker Einschränkung oder genauer Definition der Anforderungen an die Verbindung kann es passieren, dass keine passende Konfiguration gefunden wird, und somit keine Empfehlungen ausgesprochen werden können. Hierbei kann es sich um so einfache Dinge wie die Blechdicke der Fügepartner handeln. Wird z.B. nach einer Paarung von 2mm starken Blechen gesucht und es sind nur Blechpaarungen von 1,8mm Stärke in der Datenbank vorhanden, liefern diese Programme kein Ergebnis, obwohl die meisten Eigenschaften problemlos auf die größere Materialstärke übertragbar sind.

Das zeigt, dass die Konstruktionskataloge des VDI und die Fügestellenanalyse bei der geringen zur Verfügung stehenden Datenmenge nur bedingt nutzbar sind.

Aus diesem Grund wird ein Verfahren entwickelt, das die datenbankgestützten Verfahren sinnvoll ergänzt. Dieses Verfahren wird wissensbasiertes Werkzeug zur Vorauslegung von Verbindungsstellen oder kurz WWVV genannt und behandelt im Schwerpunkt die mechanischen Eigenschaften der Verbindungen. Die technologischen Randparameter der Verbindungstechnik wie Kosten, Zugänglichkeit, Lösbarkeit etc. sind in der Regel durch vorherige Projekte oder die Anschauung bekannt und können mit den bewährten Verfahren wie der Fügestellenanalyse bewertet werden. Das WWVV ist ohne großen Einarbeitungsaufwand intuitiv nutzbar. Zusätzlich ist dieses Verfahren derart gestaltet und umgesetzt, dass es mit relativ wenigen Daten gute Ergebnisse liefert. Es ist jedoch so offen, dass beliebig viele neue Ergebnisse eingepflegt werden können.

## 8.1 Allgemeine Herangehensweise

Für keinen Konstrukteur und kein computergestütztes Verfahren ist es möglich, alle Einflussparameter einer Konfigurationskonfiguration so zu erfassen, dass alle Verbindungseigenschaften für jeden möglichen Fall eindeutig abgebildet werden. Um schon in einem frühen Entwicklungsstadium grundlegende Entscheidungen treffen zu können, wird bei Neukonstruktionen auf die gewonnenen Erfahrungen der entsprechenden Fach-

bereiche mit Vorgängermodellen bzw. ähnlichen Modellen zurückgegriffen, um so die konstruktiven Probleme mit bestehenden Erkenntnissen zu vergleichen. Eine abschließende Beurteilung einer Konstruktion ist erst nach Versuchen an Subkomponenten oder gar erst durch Feldversuche anhand der gesamten Karosserie möglich.

Existieren für die aktuelle Problemstellung keine eindeutigen Ergebnisse oder ausreichenden Erfahrungswerte müssen die Lösungen erarbeitet werden. Dabei werden die Szenarien im Rahmen einer Testpyramide [US 02] über Subkomponenten bis auf die Probenebene heruntergebrochen. Auf der Probenebene können verschiedene Konzepte und Konfigurationen mit verhältnismäßig geringem Aufwand verglichen werden. Anschließend werden die neu gewonnenen Ergebnisse wieder auf das aktuelle Problem übertragen, so dass im Vergleich mit dem Bekannten Rückschlüsse auf die neue Konfiguration möglich sind.

Die Wahl der Verbindungstechnik läuft nach demselben Prinzip ab. Verschiedene Verbindungskonfigurationen werden anhand einfacher Normkörper untersucht und verglichen (vgl. Kap. 2.2, S. 36), um anschließend die Ergebnisse auf die konkrete Problemstellung zu übertragen. Die Ergebnisse werden in unterschiedliche Datenbanken eingepflegt und sind dem Fachbereich bekannt. Die Aufbereitung der Ergebnisse für den Konstrukteur findet meist nicht statt bzw. ist problematisch, da die Anzahl der durchgeführten Versuche meist nur für einen Einblick, jedoch nicht für eine umfassende Darstellung und Bewertung der untersuchten Verbindungstechnik ausreicht. Ein Einbinden der Ergebnisse in die dafür angedachten Konstruktionskataloge des VDI oder die datenbankgestützte Fügstellenanalyse der Audi AG gibt dem Konstrukteur nur unzureichende Informationen über eine neue Verbindungskonfiguration.

Ein schrittweises Vorgehen aufbauend auf den Erfahrungen mit Hilfe der Konstruktionskataloge des VDI oder der Fügstellenanalyse der Audi AG ist nicht möglich, da hier die Verbindungseigenschaften der einzelnen Konfigurationen anhand von Kennwerten losgelöst von der eigentlichen Problemstellung abgebildet werden und der direkte Ver-

gleich mit bekannten Konfigurationen fehlt. Eine allgemein gültige Beschreibung der Verbindungseigenschaften durch einzelne Kennwerte ist in der Regel unmöglich.

Um diesen Problematiken zu begegnen und zur Ergänzung der bisher bekannten Verfahren, wird mit der WWVV ein einfaches Werkzeug bereitgestellt, das sich an der Vorgehensweise des Konstruktionsprozesses orientiert und hilft, Erfahrungen zu nutzen und auf den neuen Fall zu übertragen.

Dabei läuft die WWVV nach dem in Abbildung 8.1 (S. 183) dargestellten Schema in sechs Schritten ab:

### 1. Analyse der zu ersetzenden Verbindung

Zu Beginn wird die zu ersetzende Verbindung untersucht. Bei dieser handelt es sich um die Konfiguration, die dem Konstrukteur z.B. aus dem Vorgängermodell bekannt ist. Es werden sämtliche Informationen über die Verbindung zusammengetragen und auf die in der Datenbank gespeicherte Konfigurationen und Geometrien abstrahiert.

### 2. Wahl einer Referenz

Da es unwahrscheinlich ist, dass die benötigte Materialpaarung und das Fügeverfahren in der Datenbank vorhanden sind, wird die am nächsten liegende Konfiguration als Referenz gewählt. Ist z.B. eine benötigte Schraubverbindung in der Datenbank nicht vorhanden, kann eine vergleichbare Blindnietverbindung mit ähnlichen Materialstärken gewählt werden. Halten sich die Abweichungen von der Ausgangskonfiguration in Grenzen, wird diese den Erfahrungen nach ähnlich und übertragbar sein und damit für die Vorauslegung während früher Konstruktionsphasen genügen.

### 3. Wahl der Alternativkonfiguration

Nach der Auswahl einer geeigneten Referenzverbindung wird eine alternative Verbindung bzw. Konfiguration aus der Datenbank ausgewählt, um sie mit der Referenzverbindung zu vergleichen.



#### 4. Vergleichsdarstellung

Durch die direkte Gegenüberstellung der Verbindungseigenschaften und des Verbindungsverhaltens der alternativen Konfiguration und der Referenz können anhand der einfachen Normgeometrie die Unterschiede zwischen der alternativen Konfiguration und der Referenzverbindung abgeschätzt werden. Diese Darstellung wird in Kapitel 8.2.2 (S. 186) detailliert erläutert.

#### 5. Entscheidungsprozess

Anhand der direkten Vergleichsdarstellung wird für den vorliegenden Fall entschieden, ob die Eigenschaften der Alternativkonfiguration ausreichend sind. Falls dies nicht der Fall ist, können die letzten Schritte mit anderen Alternativen wiederholt oder eine Anpassung der Verbindungskonfiguration in Betracht gezogen werden. Gegebenenfalls ist es ausreichend, sofern es die Konstruktion zulässt, eine Anpassung z.B. der Klebnahtlänge oder der Anzahl der mechanischen Elemente vorzunehmen. Sind die Anforderungen trotzdem nicht erfüllbar, muss nach Alternativen außerhalb der im WWVV gespeicherten Verbindungskonfigurationen gesucht oder die Konstruktion umgearbeitet werden.

#### 6. Abschließende Beurteilung

Abschließend wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse und die Anwendbarkeit der alternativen Verbindungskonfiguration beurteilt, indem die anhand von Normkörpern gewonnenen Ergebnisse auf die neue Konstruktion übertragen werden.

Das Verfahren eignet sich für die Untersuchung jeder Verbindungsstelle. Für unterschiedliche Lastfälle oder sonstige Einflüsse wie beispielsweise Alterung muss dieses Verfahren mehrfach wiederholt werden, bis alle relevanten Einflussfaktoren abschätzt sind. Bei geeigneter Wahl der Referenzverbindung können ebenfalls alle in Kapitel 2.3 (S. 42) aufgeführten Kennzahlen und Abminderungsfaktoren im WWVV dargestellt werden. In jedem Fall ist die kritische Betrachtung sämtlicher Schritte unverzichtbar, um die Qualität der Aussage für die vorliegende Konstruktion beurteilen zu können.

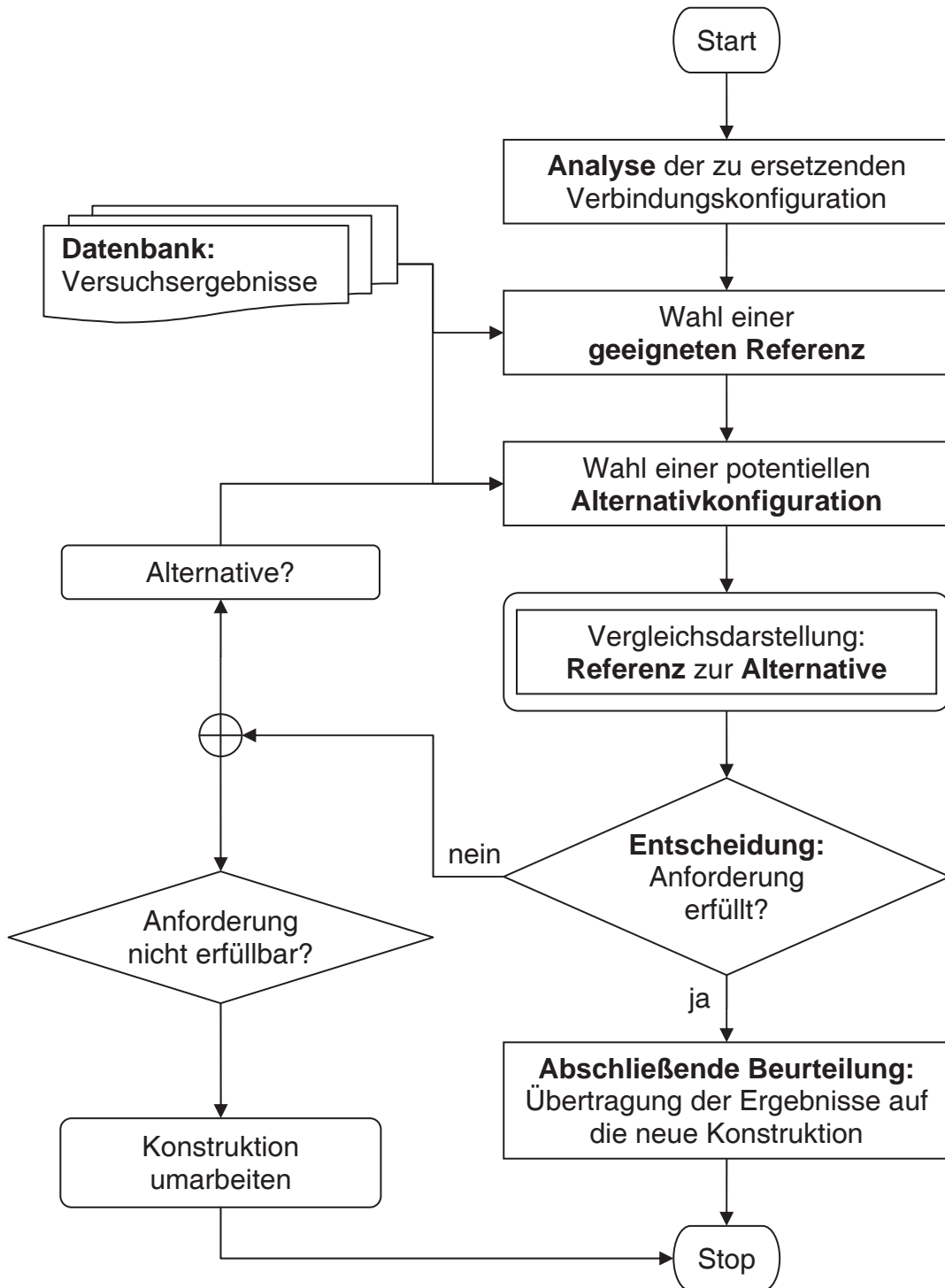


Abb. 8.1: Schematischer Ablauf des wissensbasierten Werkzeugs zur Vorauslegung von Verbindungsstellen (WWVV)

## 8.2 Umsetzung in ein anwendbares Werkzeug

Um möglichst viele Versuchsergebnisse handhaben zu können, werden die Ergebnisse der untersuchten Verbindungen in einer Datenbank zusammengefasst. Zur einfachen Handhabung dieser Datenbank wird eine Umgebung mit einer grafischen Oberfläche mit Hilfe der Programmierumgebung MatLab erstellt. So kann jederzeit ohne Einarbeitung auf die Ergebnisse zurückgegriffen werden.

### 8.2.1 Datenbasis

Zur Erweiterung der Datenbasis kann jeder Zugscherversuch, der den verwendeten Normkörpern entspricht, in die Datenbank eingepflegt werden. Um die Datenbank klein zu halten und trotzdem möglichst viele Informationen über das Verbindungsverhalten zu vermitteln, werden vereinfachte Versuchskurven in der Datenbank gespeichert.

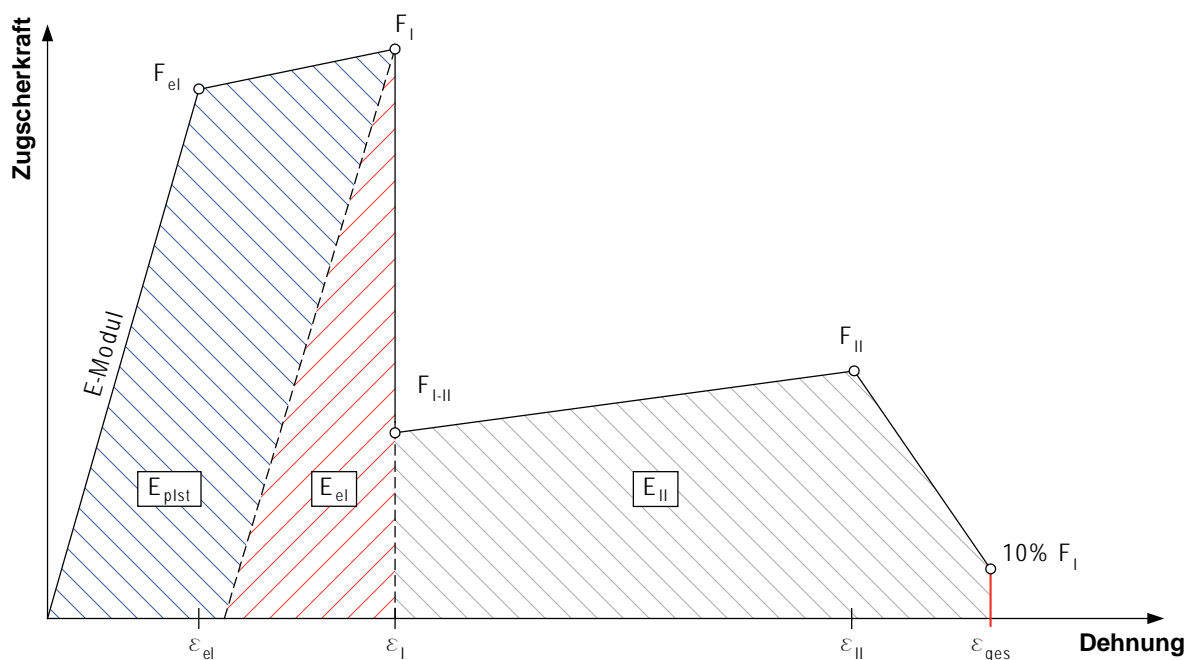


Abb. 8.2: Charakteristischer Kraft-Dehnungsverlauf mit Definition der Kennzahlen

Eine Analyse der gewonnenen Messdaten zeigt, dass sich jede Mischverbindung mit geringen Abweichungen durch einen einfachen charakteristischen Polygonzug wie in Abbildung 8.2 (S. 184) darstellen lässt. Dies gilt sowohl für die quasistatischen als auch für die Hochgeschwindigkeitszugscherversuche.

Dabei wird das komplette Tragverhalten der Verbindung bzw. der Kraft-Dehnungsverlauf, wie bereits in Kapitel 2.3 (S. 42) angesprochen, in drei Teile unterteilt:

1. elastischer Anteil (Index: *el*) im primären Tragverhalten (Index: *I*)
2. plastischer Anteil (Index: *plst*) im primären Tragverhalten (Index: *I*)
3. sekundäres Tragverhalten (Index: *II*)

Um den Polygonzug und damit eine Verbindung vollständig zu beschreiben, ist neben der Probengeometrie und den Prüfbedingungen die Identifizierung und Speicherung von fünf markanten Punkten im Kraft-Dehnungsverlauf nötig.

Diese sind im Einzelnen:

1. Übergang vom linear elastischen zum plastischen Bereich:  
Kraft  $F_{el}$  bei einer Dehnung von  $\varepsilon_{el}$
2. Maximum im primären Tragverhalten: Kraft  $F_I$  bei einer Dehnung von  $\varepsilon_I$
3. Übergang vom primären zum sekundären Tragverhalten:  
Kraft  $F_{I-II}$  bei einer Dehnung von  $\varepsilon_{I-II} = \varepsilon_I$
4. Charakteristischer Punkt im Sekundären Tragverhalten:  
Kraft  $F_{II}$  bei einer Dehnung von  $\varepsilon_{II}$
5. Totalversagen der Verbindung: Kraft  $10\% \cdot F_I$  bei einer Dehnung von  $\varepsilon_{ges}$

Aus diesen fünf Punkten können sämtliche Informationen wie die Energieaufnahmen der einzelnen Bereiche oder die Steifigkeit berechnet werden. Somit werden das wesentliche Verbindungsverhalten übersichtlich und leicht verständlich zusammengefasst.

Zusätzlich werden noch Informationen zur Bewertung des Gewichts einer Verbindungskonfiguration gespeichert. Um auch bei unterschiedlichen Materialpaarungen einen Vergleichswert zu erhalten, wird hierzu das Fügstellengewicht bestehend aus der Materialdopplung zuzüglich der Fügehilfsmittel, wozu auch eventuelle Aufdopplungen zählen, herangezogen.

## 8.2.2 Grafische Oberfläche

Die in der Datenbank gespeicherten Ergebnisse werden durch eine grafische, intuitiv bedienbare Oberfläche veranschaulicht. Neben den Feldern zur Auswahl der alternativen Datensätze, des Referenzdatensatzes und der Einflussfaktoren für die jeweiligen Datensätze werden insgesamt drei wichtige Darstellungen geboten (Abb. 8.3, S. 187), an denen unterschiedliche Dinge zu erkennen und abzuleiten sind. Hierbei ist immer eine direkte Gegenüberstellung mit einem gewählten Referenzdatensatz möglich.

Diese drei Darstellungen sind:

1. die referenzierte Darstellung (Abb. 8.3, S. 187, li. o.)
2. die absolute Darstellung (Abb. 8.3, S. 187, re. o.)
3. der charakteristische Kraft-Dehnungsverlauf (Abb. 8.3, S. 187, u.)

Es ist möglich, gleichzeitig mehrere Datensätze für einen Direktvergleich auszuwählen. Um die Darstellung für eine Betrachtung der übersichtlich Kennwerte übersichtlich zu halten, lassen sich die unterschiedlichen Informationen ein- und ausblenden.

### 8.2.2.1 Referenzierte Anzeige

In der referenzierten Anzeige werden die Ergebnisse einer alternativen Verbindungskonfiguration auf die gewählte Referenz bezogen in einem Netzdiagramm dargestellt

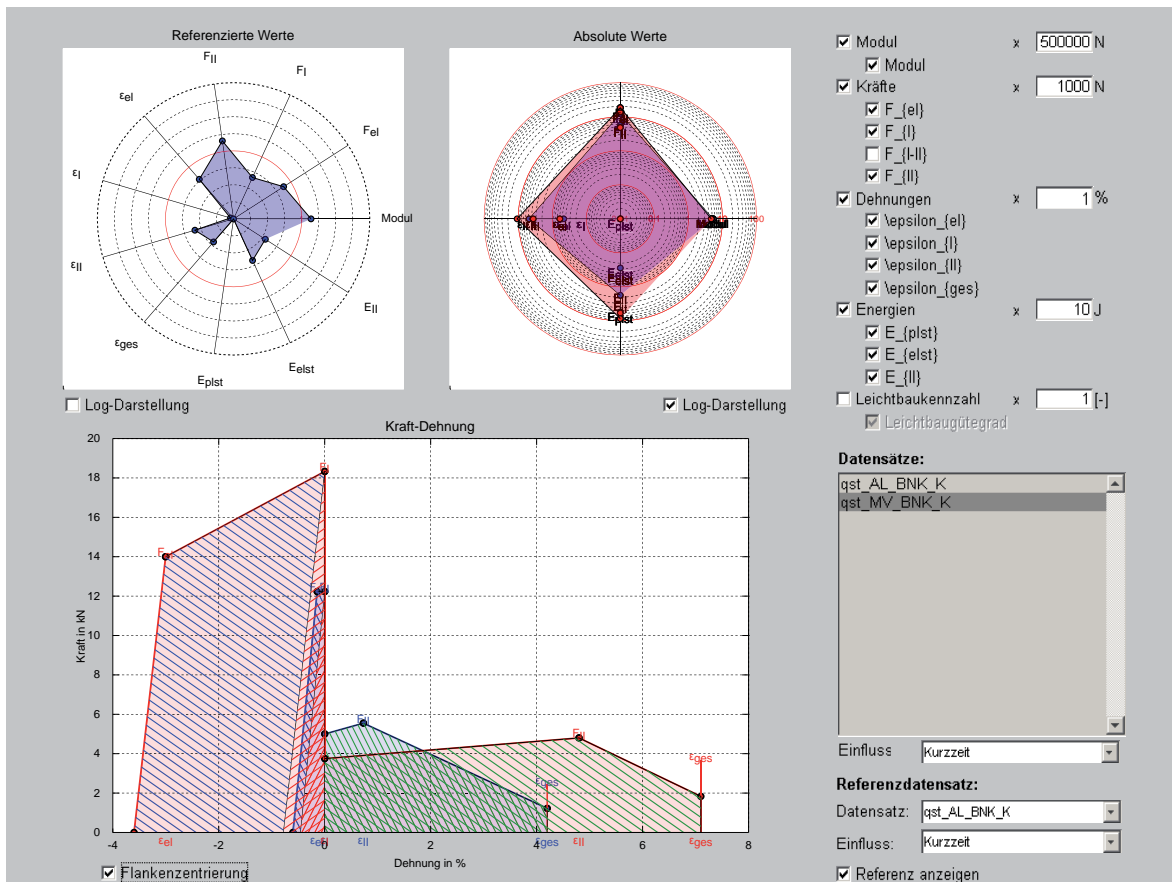


Abb. 8.3: Grafische Oberfläche des wissensbasierten Werkzeugs zur Vorauslegung von Verbindungsstellen (WWVV) in der Programmierumgebung MatLab

(Abb. 8.3, S. 187, li. o.). Durch die Wahl der entsprechenden Referenz sind die Ergebnisse einer neuen Konfiguration anhand einer bekannten Konfiguration oder auch Einflussfaktoren wie Alterung im direkten Vergleich abzuschätzen.

Je nach Wahl der Referenz können hier die in Kapitel 2.3 (S. 42) definierten Kennzahlen (VGG, RKZ, A) dargestellt und direkt abgelesen werden.

Mit Hilfe der von den eingeblendeten Informationen aufgespannten Fläche im Netzdiagramm ist visuell ein Vergleich unterschiedlicher Konfigurationen und Einflussfaktoren möglich. Durch selektives Einblenden unterschiedlicher, besonders interessanter Werte ist eine visuelle Wichtung möglich.

### 8.2.2.2 Absolute Anzeige

In der absoluten Darstellung (Abb. 8.3, S. 187, re. o.) ist es möglich, alle Werte in absoluter Darstellung skaliert durch den hinter dem Parameter stehenden Faktor aufzuzeigen. Diese Darstellung ermöglicht es, ein Gefühl für die absolute Größe der Kennwerte zu bekommen, um so die Relevanz der dargestellten Daten besser abschätzen zu können.

Dabei werden im Gegensatz zur referenzierten Darstellung die Werte einer Gruppe jeweils auf einer Achse aufsummiert aufgetragen. So sind die Anteile der einzelnen Gruppenmitglieder an der gesamten Gruppe erkennbar wie z.B. der Anteil der plastischen Dehnung an der Gesamtdehnung einer Konfiguration.

Es ist zu beachten, dass nur ausgewählte Parameter aufsummiert werden. Sind nur die elastische Energieaufnahme und die Energieaufnahme des sekundären Lastniveaus im Menü ausgewählt, werden nur diese beiden aufsummiert dargestellt. Wird beispielsweise eine ähnliche Materialpaarung wie in den Versuchen verwendet, aber aufgrund einer geometrischen Versteifung kein ausgeprägtes Fließen der Fügepartner erwartet, kann so der plastische Anteil der Energieaufnahme herausgenommen und die Ergebnisse auf diesen konkreten Fall übertragen werden.

### 8.2.2.3 Kraft-Dehnungsdiagramm

Um eine Vorstellung vom Verhalten der Verbindung zu bekommen, wird ein Diagramm mit einem vereinfachten Kraft-Dehnungsverlauf zur Verfügung gestellt (Abb. 8.3, S. 187, u.). Durch die Darstellung des bei der Versuchsauswertung ermittelten charakteristischen Polygonzugs (Kap. 8.2.1, S. 184) wird in einer einfachen und selbsterklärenden Weise Verständnis für das Tragverhalten der Verbindung aufgebaut.

Um primäres und sekundäres Tragverhalten besser vergleichen zu können, kann die sogenannte Flanken-zentrierung aktiviert werden. Hierbei werden die Kraft-Dehnungsverläufe

so verschoben, dass die Flanken des primären Versagens der unterschiedlichen Konfigurationen übereinander liegen.

Die Unterteilung des Tragverhaltens in die drei Teile (elastisches und plastisches primäres Tragverhalten sowie sekundäres Tragverhalten) und das Verständnis für das Tragverhalten ermöglichen eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Verbindungskonfigurationen, ähnlich der absoluten Darstellung. Durch die direkte Überlagerung der Kraft-Dehnungsverläufe ist die Zusammensetzung des Tragverhaltens zu erkennen und wichtige Rückschlüsse für die Konstruktion sind möglich.

Dies gilt sowohl für den direkten Vergleich zwischen zu ersetzenden Verbindung und der Alternativkonfiguration als auch für die Übertragung auf nicht in der Datenbank erfasste Konfigurationen. Werden bei einer Verbindung beispielsweise die Blechstärken erhöht, wird es zu einem geringeren plastischen Weg bei einer ähnlichen Zugscherfestigkeit kommen. Es ist möglich, den plastischen Anteil (Abb. 8.3, S. 187, blau dargestellt) herauszunehmen und so auf das geänderte Verbindungsverhalten zu schließen. Natürlich ist eine einfache Überlagerung der Effekte nur im begrenzten Maße möglich, aber für eine Vorauslegung völlig ausreichend.

Mit Hilfe des in den Kraft-Dehnungsverläufen aufgezeigten Verbindungsverhaltens ist es möglich, das Verhalten der Verbindungskonfiguration zu verstehen und gezielt nach Lösungen für das Verbindungsproblem zu suchen.

## 8.3 Beispielhaftes Vorgehen

Um die Anwendung des WWVV zu verdeutlichen, wird das Vorgehen anhand eines fiktiven Beispiels dargestellt. Angenommen der Konstrukteur sucht nach einer geeigneten Verbindung, um einen Dachrahmen aus CFK anstelle eines Dachrahmens aus Aluminium in eine Aluminiumstruktur einzusetzen. Dabei betrachtet er die Anbindung des vorderen Dachrahmens (vgl. Abb. 3.5, S. 55):



### 1. Analyse der zu ersetzenden Verbindung

Bei der Analyse einer ähnlichen Aluminiumkarosserie stellt der Konstrukteur fest, dass der Dachrahmen mit Hilfe von zwei Halbhohlstanznietpunkten fixiert und anschließend mit dem MIG-Schweißverfahren verschweißt wird. Da das Strangpressprofil des Dachrahmens mit Hilfe eines Flansches an zwei Schließbleche gefügt wird, kann die Verbindungsgeometrie als einfach überlappende Verbindung idealisiert werden.

### 2. Wahl einer Referenz

Nun wählt der Konstrukteur eine Referenz aus der Datenbank aus. Hier versucht er möglichst genau die Verbindungskonfiguration, d.h. Geometrie und Fügeverfahren aus Schritt 1, zu treffen. Falls die exakte Konfiguration nicht vorliegt, wählt der Konstrukteur eine einfach überlappende MIG geschweißte Verbindung mit leichten Abweichungen von der idealisierten Konfiguration, z.B. bezüglich der Materialstärke. Die Fixierung durch die Halbhohlstanzniete wird hierbei vernachlässigt.

### 3. Wahl der Alternativkonfiguration

Da das MIG-Schweißverfahren nicht für Faserkunststoffverbunde geeignet ist, muss ein alternatives Fügeverfahren gesucht werden. Hier entscheidet sich der Konstrukteur im ersten Schritt für eine Klebung und wählt die entsprechende Verbindungskonfiguration, die zu seiner Materialpaarung passt, aus der Datenbank aus.

### 4. Vergleichsdarstellung

Mit Hilfe der Gegenüberstellung der Verbindungskennwerte ist es dem Konstrukteur möglich, die Referenz mit der alternativ gewählten Konfiguration zu vergleichen. Zuerst muss der Konstrukteur anhand der absoluten Darstellung entscheiden, ob seine gewählte Referenz in etwa die Realität für die im Fahrzeug betrachtete Verbindung ausreichend gut darstellt. In der referenzierten Anzeige

kann er dann überblicken, in welchem Maße die Kennwerte der Alternative von denen der Referenzverbindung aus Schritt 2 abweichen.

Um eine umfassende Beurteilung der Verbindungseigenschaften zu erhalten, müssen hier alle relevanten Belastungsarten und Einflussfaktoren wie z.B. Alterung betrachtet und verglichen werden.

### 5. Entscheidungsprozess

Aufgrund der Vergleichsdarstellung muss der Konstrukteur entscheiden, ob die alternative Verbindungskonfiguration die gestellten Anforderungen erfüllt. Dabei sind nur die relevanten Kennwerte in Betracht zu ziehen. Erfüllt die gewählte Verbindung die Anforderungen nicht, muss der Konstrukteur iterativ z.B. durch die Wahl alternativer Klebstoffe nach Alternativen suchen. Das Kraft-Dehnungsdiagramm ermöglicht es dem Konstrukteur, diese Suche gezielt zu gestalten, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Erfüllt beispielsweise die alternative Konfiguration alle Anforderungen bis auf die Energieaufnahme, so ergeben sich aus der Gegenüberstellung der Kraft-Dehnungsverläufe unterschiedliche Möglichkeiten, die Energieaufnahme zu erhöhen (vgl. Kap 6, S. 123). Das sind beispielsweise:

- a) Vergrößerung der plastischen Dehnung bzw. Erhöhung des primären Lastniveaus, z.B. durch Verstärkungsmaßnahmen wie der Z-Vernähung
- b) Wahl einer kombiniert gefügten Verbindungskonfiguration
- c) Erhöhung des sekundären Lastniveaus, z.B. durch Aufdopplungen
- d) Verlängerung des sekundären Lastniveaus, z.B. durch eine größere Überlappungslänge und damit Verlängerung des Lochleibungswegs im FKV-Werkstoff

### 6. Abschließende Beurteilung

Nachdem der Konstrukteur so eine alternative Verbindungskonfiguration identifiziert hat, muss abschließend eine kritische Betrachtung aller relevanten Belas-

tungsarten und Einflussfaktoren erfolgen. Dabei müssen die Ergebnisse zurück auf die Fahrzeugstruktur übertragen werden und auf ihre Richtigkeit und die Anwendbarkeit des Fügeverfahrens im Fertigungsprozess im Rahmen der Untersuchung auf Fügbarkeit hinterfragt werden. Eventuell muss der Auswahlprozess erneut durchlaufen oder es müssen spezielle Maßnahmen abgeleitet werden. Beispielsweise kann eine Alternativkonfiguration alle Anforderungen im ungealterten Zustand erfüllen. Im gealterten Zustand jedoch ist der Abfall der Kennwerte nicht akzeptabel. Zusätzliche Maßnahmen zum Korrosionsschutz wie beispielsweise eine PVC-Feinnahtabdichtung können zu einer Eignung der Verbindungskonfiguration führen. Somit kann bei gesamtheitlicher Betrachtung eine nur teilweise geeignete Verbindungskonfiguration in Kombination mit zusätzlichen Maßnahmen eine bessere Alternative zu einem vollkommen geeigneten, aber aufwändigen und teuren Fügeverfahren sein.

Da ein Verständnis für die Verbindungskonfiguration aufgebaut wurde und das Verfahren nicht nur die Datenbank nach passenden Kennwerten durchsucht, sind auch solche Abschätzungen mit Hilfe des WWVV und dem Ingenieursverstand für den Konstrukteur möglich.

# 9 Zusammenfassung

## 9.1 Darstellung der Ergebnisse

Für die Mischbauweise im Automobilbau kommen unterschiedliche Werkstoffkombinationen in Frage. Diese Werkstoffkombinationen bringen neue Herausforderungen an die Fügetechnik mit sich. In der hier vorliegenden Arbeit werden die Mischverbindungen zwischen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) und Aluminium (Al) detailliert und umfassend betrachtet. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Fügung im automobilen Karosseriebau.

Im Hinblick auf einen Einsatz von strukturell tragenden CFK-Bauteilen in größeren Fahrzeugserien wurde zunächst ein Faserverbundwerkstoff gesucht und identifiziert, der für einen Einsatz und eine Fügung im automobilen Karosseriebau geeignet ist. Entgegen den Erwartungen hat das Faserhalbzeug bzw. die Fasern einen erheblichen Einfluss auf die Temperaturbeständigkeit des Laminats. So wurde in Abhängigkeit vom Faserhalbzeug ein Abfall der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit um 20% mit Hilfe von ILSS-Versuchen durch die Temperaturbelastungen im Karosseriebau, vor allem im KTL-Trocknungsofen, festgestellt. Die Eignung der gewählten Faser-Matrix-Kombination wurde anschließend mit der Untersuchung auf Fügbarkeit nachgewiesen.

Die Untersuchung unterschiedlicher Fügeverfahren zeigte, dass sich die Ergebnisse und das Verbindungsverhalten kombinierter Fügeverfahren (stofflich und mechanisch) aus

den Ergebnissen der einzelnen elementaren Fügungen superpositionieren lassen. So ist es möglich, aus kombiniert gefügten Proben das Verhalten der elementar gefügten Proben abzuleiten.

Weitergehend wurde exemplarisch eine Blindnietklebung sowie eine FDS-Klebung mit Fügung im Karosseriebau umfassend und detailliert untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Einflussfaktoren wie die Wärmedehnung, Alterung und die Art der Belastung untersucht. Es wurden quasistatische Versuche, Hochgeschwindigkeitszugsversuche (HZV) und Dauerschwingversuche vor und nach Alterung durch 140 Tage KKT durchgeführt, um so eine umfassende Bewertung der Belastungsart auch in Abhängigkeit von der Alterung zu ermöglichen. Ergänzend zu den Untersuchungen mit Fügungen im Karosseriebau wurde eine Blindnietklebung mit Fügung in der Montage mit dem gleichen Versuchsprogramm untersucht, um so den aktuellen Stand der Technik im Automobilbau mit der Karosseriebaulösung vergleichbar darzustellen.

Durch einen Vergleich mit einer äquivalenten Al-Al-Blechverbindung wurde die Effizienz der Mischverbindung in Bezug auf die unterschiedlichen Kennwerte wie Steifigkeit, primäres und sekundäres Tragverhalten und die Energieaufnahme mit einem aus dem Metallbau bekannten Szenario abgeschätzt.

Aufgrund der beobachteten Schadensmechanismen wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften diskutiert und teilweise in ergänzenden Versuchen abgeschätzt. Die textile Nähetechnik wurde als besonders geeignetes Verfahren identifiziert und aufgrund ihrer Effektivität angewendet. Dominierend für ein vorzeitiges Verbindungsversagen sind Delaminationen im FKV-Werkstoff, ausgelöst durch die hohen Schäl- und Scherspannungen im Fügebereich der einschnittigen Verbindung. Durch die lokale Z-Verstärkung des FKV-Fügepartners im Fügebereich mit Hilfe der Nähetechnik werden die Schäl- und Scherfestigkeiten des FKV-Werkstoffs effizient verbessert und vorzeitige Delaminationen im FKV verhindert. Dieses führt zu einer Verbesserung des primären Tragverhaltens und somit höheren Festigkeiten der Klebverbindung und zu einer Verlagerung der Schadenszone vom FKV-Inneren in die äußere Harz-

schicht bzw. der Klebschichtgrenzfläche. Zum anderen wird durch die Z-Verstärkung die Vorschädigung durch die Delaminationen, die durch die Schäl- und Scherkräfte vor Versagen der Klebung auftreten, vermindert und die Lochleibungsfestigkeit des Laminats verbessert, so dass zusätzlich die sekundären Verbindungseigenschaften verbessert werden.

Eine umfassende Parameterstudie ergab, dass bei der Verwendung eines Glasfaser-garns mit einem Stichraster von  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}$  die beste Verstärkungswirkung erreicht wird. Die Versuchsergebnisse der optimierten Konfiguration zeigten bei allen Belastungsarten signifikante Verbesserungen vor allem in der Energieaufnahme gegenüber den unverstärkten Versuchen. Ergänzende Versuche zeigten die Möglichkeit kombinierter Verstärkungsverfahren wie beispielsweise eine Aufdopplung zusätzlich zur Z-Verstärkung auf. Das Niveau bezüglich der Festigkeit und Energieaufnahme der Al-Al-Verbindung mit Fügung im Karosseriebau konnte jedoch bei keiner Mischverbindung erreicht werden. Jedoch konnte durch die unterschiedlichen Verstärkungsmaßnahmen das Festigkeitsniveau und die Energieaufnahme der verstärkten Proben auf über 80% der Al-Al-Verbindung gesteigert werden.

Zur Verdeutlichung und zum Verständnis der auftretenden Effekte wurde ein FE-Simulationsmodell der Zugscherproben mit der Software PAM-Crash aufgebaut. Dabei wurden zwei Modellierungsansätze für die Z-Verstärkung entwickelt. Die Verstärkungsfäden wurden zum einen mit Hilfe von Volumenelementen (Solids) und zum anderen mit Hilfe von Balkenelementen (Beams) in das FE-Modell implementiert. So können die Schädigungs- und Schadensmechanismen der unverstärkten sowie der Z-verstärkten Versuche nachvollzogen werden. Auch hier wird bestätigt, dass Delaminationen in unterschiedlichen Laminatschichten der dominierende Schädigungs- und Schadensmechanismus sind. Die Kraft-Dehnungsverläufe der Simulation weisen einen zu steifen, aber prinzipiell ähnlichen Verlauf wie die in den Versuchen ermittelten Kraft-Dehnungsverläufe auf. So ist eine Optimierung der Z-Verstärkung mit Hilfe der FE-Simulation möglich. Da beide Modelle das im Versuch beobachtete Bruchverhalten und

die auftretenden Effekte sehr gut abbilden und beide Modelle aufgrund von Beschränkungen in den Materialmodellen Stärken und Schwächen besitzen, ist keiner der beiden Modellierungsansätze eindeutig zu favorisieren.

Für eine einfache Darstellung der Ergebnisse wurde das wissensbasierte Werkzeug zur Vorauslegung von Verbindungsstellen (WWVV) entwickelt und mit einer grafischen Oberfläche in der Programmierumgebung MatLab umgesetzt. Durch die Aufbereitung der Ergebnisse mit diesem Werkzeug wurde ein Hilfsmittel geschaffen, das schon mit sehr geringen Datenmengen Kenntnisse über die dargestellte Verbindung und ihr Verhalten vermittelt. So hat der Konstrukteur anhand von Basiswerten aus dem charakteristischen Kraft-Dehnungsverlauf die Möglichkeit, auch neue Technologien und Verfahren für einen aktuellen Anwendungsfall abzuschätzen, zu vergleichen und umfassend zu beurteilen. Durch die grafische Aufbereitung und Darstellung der Verbindungskennwerte und des Verbindungsverhaltens ist der Konstrukteur in der Lage, gezielt nach der optimalen Verbindungstechnik für seinen vorliegenden Fall zu suchen.

Somit wurden für den Einsatz von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen in einer Aluminiumkarosserie die Grundlagen für die Verbindungstechnik für CFK-Al-Mischverbindungen im Automobilbau mit Schwerpunkt auf der Fügung im Karosseriebau geschaffen.

## 9.2 Ausblick

Mit vorliegender Arbeit sind die Grundlagen für den Einsatz strukturell tragender Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen mit Fügung im Karosseriebau geschaffen. Da das wissensbasierte Werkzeug zur Vorauslegung von Verbindungsstellen (WWVV) offen gestaltet ist, besteht die Möglichkeit, zu den mechanischen Kennwerten weitere Kennwerte aufzunehmen und so das WWVV sinnvoll zu erweitern. Es besteht die Möglichkeit, eine Bewertung technologischer Randparameter für die unterschiedlichen

Fügeverfahren und Materialkombinationen vorzunehmen, um so das Bild von den in der Datenbank vorhandenen Verbindungskonfigurationen noch umfassender zu gestalten.

Eine zukünftige Aufgabe wird sein, die bereits vorhandenen Versuchsergebnisse in die Datenbasis des wissensbasierten Werkzeugs zur Vorauslegung von Verbindungsstellen einzupflegen, um somit die Datenbasis zu erweitern. Hier kann vor allem die Datenbasis der Fügstellenanalyse intensiv genutzt werden, da hier die gleiche Probengeometrie verwendet wird und die Datenbank des WWVV derart gestaltet ist, dass sich diese bereits vorhandenen Ergebnissen problemlos einbinden lassen.

Ausgehend von den Ergebnissen der FE-Simulation für die verstärkten Proben kann mit einer intensiven Optimierung einer Z-Verstärkung begonnen werden. Diese Optimierung kann im ersten Schritt simulativ mit Hilfe eines Optimierers erfolgen, um z.B. nicht-quadratische Stichraster zu untersuchen und / oder eine optimale Nahtbahnanzahl zu ermitteln. Es bleibt ebenfalls Spielraum für weitere vertiefende experimentelle Untersuchungen, um diese Ergebnisse zu validieren. Parallel dazu ist die Weiterentwicklung der in die Arbeit entwickelten Modellierungsansätze für die Z-Verstärkung zu empfehlen, so dass beispielsweise eine Beeinflussung der in-plane Eigenschaften durch die Z-Verstärkung berücksichtigt oder die Rechenzeit verkürzt wird.

Ebenso sind die in Kapitel 6 (S. 123) angesprochenen Verstärkungsmaßnahmen allein oder in Kombination mit einer Z-Verstärkung weiter zu betrachten, um das Potential der Mischverbindung weiter zu erhöhen, wie es bereits die Kombination von Aufdoppung und Z-Verstärkung in dieser Arbeit gezeigt hat.

Durch diese weiteren Untersuchungen können die in dieser Arbeit gewonnenen Grundlagen ausgebaut und weitere Erfahrungen gesammelt werden, so dass das Potential dieser Materialkombination von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen und Aluminium in Zukunft voll genutzt werden kann. Die Fügung der CFK-Strukturbauteile in der Serienfertigung im Karosseriebau schafft eine wichtige Voraussetzung für den umfassenden Einsatz dieses Werkstoffs im Automobilbau.



# Literaturverzeichnis

- [ACE08] *Entwicklung und Serienfertigung der CFK/RTM-Heckklappe für den Lamborghini Gallardo Spyder*. Version: 2008. <http://ace-composite.de/32-automotive.htm>, Abruf: 08.01.2008. Advanced Composite Engineering GmbH (ACE). – Online Ressource
- [Arb03] ARBEITSKREIS FASERVERBUND-LEICHTBAU (FL): *Luftfahrttechnisches Handbuch (LTH)*. Ottobrunn, Dezember 2003
- [Ax04] AX, Holger: *Testing and modelling of an adhesively bonded Aluminium Structure under static and dynamic load*, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart; School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, Diplomarbeit, Dezember 2004
- [Ban01] BANNISTER, Michael: Challenges for composites into the next millennium – a reinforcement perspective. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 32 (2001), Nr. 7, 901–910. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00008-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00008-2). – DOI 10.1016/S1359-835X(01)00008-2. – ISSN 1359-835X
- [BGKS05] BROCKMANN, Walter ; GEISS, Paul L. ; KLINGEN, Jürgen ; SCHRÖDER, Bernhard: *Klebtechnik, Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2005. – ISBN 978-3-527-31091-3  
3-527-31091-6

- [Bla87] BLAZYNSKI, T. Z. (Hrsg.): *Materials at high Strain Rates*. London and New York : Elsevier Applied Science, 1987. – ISBN 1–85166–067–4
- [BLBN04] BLECK, Wolfgang ; LAROUR, Patrick ; BÄUMER, Annette ; NOACK, Julio: Einflüsse der Messtechnik auf die Ergebnisse von Hochgeschwindigkeitszugversuchen. In: *Werkstoffprüfung-Tagung 2004*. Neu-Ulm : Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM), November 2004, S. 10
- [BM05] BECHTHOLD, Michael ; MÖLTGEN, Bruno: SLR Crashelement - von der Konzeptidee zum Serieneinsatz. In: *Kunststoffe im Automobilbau, Tagung, Mannheim, DE, 9.-10. März, 2005*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 9.-10. März 2005 (Schriftenreihe Kunststofftechnik (VDI) 200509 01669). – ISBN 3–18–234270–3, S. 33–48
- [BMK<sup>+</sup>03] BRÜDGAM, Dr.-Ing. S. ; MESCHUT, Dr.-Ing. G. ; KÜTING, Jens ; RUTHER, Michael ; JOST, Reiner ; FREITAG, Volker ; POCOLO, Santo ; PEIZ, Volker ; HAHN, Prof. Dr.-Ing. O. ; TIMMERMANN, Rüdiger: Mischbauweise - Fügesystemoptimierung zur Herstellung von Mischbauweisen aus Kombinationen der Werkstoffe Stahl, Aluminium, Magnesium und Kunststoff / Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Paderborn, Juli 2003 (03N3077D1). – Forschungsbericht
- [BMW05] BMW PRESSE-INFORMATION: *Die Produktion des BMW M6: High-Tech und Individualität in Serie*. Version: 13. April 2005. [http://www.7-forum.com/news/news2004/m6/bmw\\_m6\\_production.php](http://www.7-forum.com/news/news2004/m6/bmw_m6_production.php), Abruf: 09.01.2008. – Online Ressource
- [BMW06] BMW PRESSE-INFORMATION: *Der BMW Hydrogen 7 - eine neue Ära der Mobilität*. Version: 12. September 2006. <http://www.7-forum.com/news/Der-BMW-Hydrogen-7-eine-neue-Aera-der-Mo-1285.html>, Abruf: 02.01.2008. – Online Ressource

- [BMW08] BMW GROUP: *Erlebnis Produktion. Wie ein Fahrzeug entsteht*.  
Version: 13. August 2008. [http://www.bmwgroup.com/bmwgroup\\_prod/d/0\\_0\\_www\\_bmwgroup\\_com/home/home.html](http://www.bmwgroup.com/bmwgroup_prod/d/0_0_www_bmwgroup_com/home/home.html), Abruf: 20.08.2008. – Online Resource
- [Buc05] BUCHMAYR, Prof. Dr. Bruno: Mechanisches Fügen. In: *SFG-Workshop „Ausgewählte Fügeverfahren“*. Burg Oberkapfenberg (AT), 15. Februar 2005
- [CDF<sup>+</sup>97] CROTHERS, P. J. ; DRECHSLER, K. ; FELTIN, D. ; HERSZBERG, I. ; BAN-  
NISTER, M.: The design and application of Tailored Fibre Placement. In:  
*11. International Conference on Composite Materials (ICCM)*. Gold Coast,  
Australia, 1997
- [CKL<sup>+</sup>06] CROSKY, A. ; KELLY, D. ; LI, R. ; LEGRAND, X. ; HUONG, N. ; UJJIN, R.:  
Improvement of bearing strength of laminated composites. In: *Composite  
Structures* 76 (2006), Nr. 3, S. 260–271. [http://dx.doi.org/10.1016/  
j.compstruct.2006.06.036](http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.06.036). – DOI 10.1016/j.compstruct.2006.06.036. –  
ISSN 0263–8223. – US Air Force Workshop Health Assessment of Composite  
Structures
- [CMR<sup>+</sup>08] CORVES, Burkhard ; M'BAREK, Taoufik ; RIEDEL, Martin ; NEFZI, Mar-  
wene ; KORDI, Tarsha: Nähen mit dem Roboter: Schnelle Nähetechnik mit  
Parallelstruktur. In: *Regelungstechnisches Kolloquium, Lehrstuhl für Rege-  
lungssystemtechnik, Universität Dortmund*, 2008
- [CTG07] COTTONE, Alessia ; TURETTA, Tiziana ; GIAMBANCO, Giuseppe: Delami-  
nation study of through-thickness reinforced composite laminates via two-  
phase interface model. In: *Composites Part A: Applied Science and Ma-  
nufacturing* 38 (2007), Nr. 9, 1985–1995. [http://dx.doi.org/10.1016/  
j.compositesa.2007.05.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.05.007). – DOI 10.1016/j.compositesa.2007.05.007. –  
ISSN 1359–835X

- [DCPR07] DELL'ANNO, Giuseppe ; CARTIÉ, Denis D. ; PARTRIDGE, Ivana K. ; REZAI, Amir: Exploring mechanical property balance in tufted carbon fabric/epoxy composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38 (2007), Nr. 11, 2366–2373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.06.004>. – DOI 10.1016/j.compositesa.2007.06.004. – ISSN 1359–835X. – CompTest 2006
- [DIN73] Norm DIN 8528 Juni 1973. *Schweißbarkeit*
- [DIN78] Norm DIN 50100 Februar 1978. *Dauerschwingversuch*
- [DIN93] Norm DIN EN 515 Dezember 1993. *Aluminium und Aluminiumlegierungen; Halbzeug; Bezeichnungen der Werkstoffzustände*
- [DIN95] Norm DIN EN 1465 Januar 1995. *Bestimmung der Zugscherfestigkeiten hochfester Überlappungsklebung*
- [DIN96a] Norm DIN EN 6037 April 1996. *Faserverstärkte Kunststoffe - Prüfverfahren - Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit*
- [DIN96b] Norm DIN EN ISO 527 1–5 April 1996. *Bestimmung der Zugeigenschaften*
- [DIN97] Norm DIN 2563 März 1997. *Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe - Unidirektionale Laminate - Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit*
- [DIN98a] Norm DIN EN ISO 14125 Juni 1998. *Bestimmung der Biegeeigenschaften*
- [DIN98b] Norm DIN EN ISO 14129 Februar 1998. *Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve, des Schubmoduls in der Lagenebene*
- [DIN98c] Norm DIN EN ISO 14130 Februar 1998. *Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken*

- [DIN99] Norm DIN EN ISO 8044 November 1999. *Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe und Definitionen*
- [DIN02] Norm DIN 61400 April 2002. *Nähstichtypen - Einteilung und Begriffe*
- [DIN03a] Norm DIN 8580 September 2003. *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*
- [DIN03b] Norm DIN 8593 0–9 September 2003. *Fertigungsverfahren Fügen*
- [DIN06] Norm DIN 8514 Mai 2006. *Lötbarkeit*
- [DJM98] DRANSFIELD, Kimberley A. ; JAIN, Lalit K. ; MAI, Yiu-Wing: On the effects of stitching in CFRPs–I. mode I delamination toughness. In: *Composites Science and Technology* 58 (1998), Nr. 6, 815–827. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00229-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00229-7). – DOI 10.1016/S0266-3538(97)00229-7. – ISSN 0266-3538
- [DMG<sup>+</sup>07] DANTULURI, Venkata ; MAITI, Spandan ; GEUBELLE, Philippe H. ; PATEL, Rakesh ; KILIC, Hakan: Cohesive modeling of delamination in Z-pin reinforced composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 67 (2007), Nr. 3-4, 616 - 631. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.024>. – DOI 10.1016/j.compscitech.2006.07.024. – ISSN 0266-3538
- [Dur07] DURST, Dipl.-Ing. Karl G.: *Beitrag zur systematischen Bewertung der Eignung anisotroper Faserverbundwerkstoffe im Fahrzeugbau*. Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, Diss., November 2007
- [Ebe06] EBEL, Christoph: *Auslegung von Krafteinleitungen in Faserverbundstrukturen*. Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Juni 2006
- [Ehr04] EHRENSTEIN, Gottfried W. (Hrsg.): *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. München : Carl Hanser, 2004. – 668 S. – ISBN 3-446-22340-1

- [Emr03] EMRICH, Stefan: *Untersuchung zum Einfluss von Oberflächenchemie und -morphologie auf die Langzeitbeständigkeit geklebter Aluminiumverbunde*. Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Universität Kaiserslautern, Diss., Juli 2003
- [FB86] FOURRIER, Thierry ; BUHL, Horst: *Glaucnic Corrosion between Carbon Fibre Reinforced Plastics and Metallic Aeronautical Materials / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)*. Köln, April 1986. – Forschungsbericht. – ISSN 0171–1342
- [FDB03] FILSINGER, J. ; DITTMANN, R.-P. ; BISCHOFF, Dr. T.: *Nähen als textile Preform-Technik zur Herstellung von Faserverbundstrukturen für Luftfahrtanwendungen am Beispiel der A380-Druckkalotte*. In: RAUMFAHRT (DGLR), Deutsche G. (Hrsg.) ; EADS Deutschland GmbH, Airbus Deutschland GmbH, SAERTEX Stade GmbH & Co.KG (Veranst.): *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2004* EADS Deutschland GmbH, Airbus Deutschland GmbH, SAERTEX Stade GmbH & Co.KG, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR), November 2003
- [FP06] FLINN, Brian ; PHARISS, Molly: *The Effect of Peel-Ply Surface Preparation Variables on Bond Quality / Department of Material Science and Engineering, University of Washington; U.S. Department of Transportation; Federal Aviation Administration; Office of Aviation Research and Development*. Washington, August 2006 (DOT/FAA/AR-06/28). – Final Report
- [GA07] GREVE, Lars ; ANDRIEUX, Florence: *Deformation and failure modelling of high strength adhesives for crash simulation*. In: *International Journal of Fracture* 143 (2007), Nr. 2, S. 143–160. <http://dx.doi.org/10.1007/s10704-007-9054-9>. – DOI 10.1007/s10704-007-9054-9. – ISSN 0376–9429 (Print) 1573–2673 (Online)

- [Geß01] GESSLER, Andreas: Textile Integrationstechniken zur Herstellung vorkonfektionierter Verstärkungsstrukturen für FVK / Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). 2001 (03N3060A9). – Forschungsbericht
- [GG06] GALANTUCCI, L. M. ; GRAVINA, A.: Surface treatment for adhesive-bonded joints by excimer laser. In: *Composites Part A* 27A (1006), 12. Februar, S. 1041–1049. [http://dx.doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)88890-7](http://dx.doi.org/10.1016/1359-835X(96)88890-7). – DOI 10.1016/1359-835X(96)88890-7. – ISSN 1359-835X
- [GGR02] GILATA, Amos ; GOLDBERG, Robert K. ; ROBERTS, Gary D.: Experimental study of strain-rate-dependent behavior of carbon/epoxy composite. In: *Composites Science and Technology* 62 (2002), 1469–1476. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00100-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00100-8). – DOI 10.1016/S0266-3538(02)00100-8. – ISSN 0266-3538
- [GHT02] GAY, Daniel ; HOA, Suong V. ; TSAI, Stephen W.: *Composite Materials: Design and Applications*. 4. Boca Raton : CRC Press, 2002. – ISBN 1-58716-084-6
- [Goe07] GOEDE, Dr.-Ing M.: Karosserieleichtbau als Baustein einer CO<sub>2</sub> - Reduzierungsstrategie. In: *16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2007*. Aachen, 2007 (Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 16)
- [GRCP99] GLAESSGEN, E.H. ; RAJU, I.S. ; C.C. POE, Jr.: Modeling The Influence Of Stitching On Delamination Growth In Stitched Warp-Knit Composite Lap Joints / National Aeronautics and Space Administration (NASA). Langley Research Center, Hampton, 1999. – Forschungsbericht
- [Gre05] GREVE, Lars: *Damage and Failure Modelling of carbon/epoxy Non Crimp Fabric Composites*, School of Industrial and Manufacturing Science, Advanced Materials Department, Diss., 2005

- [Gri07] GRIES, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. T. ; KLOPP, Dr.-Ing. K. (Hrsg.): *Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien - Verfahren und Anwendungen*. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-37227-1
- [Gro08] GROLL, Christoph: *Untersuchung des thermischen Verhaltens von Aluminium-CFK-Mischverbindungen*. Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, unveröffentl. Studienarbeit, August 2008
- [Grz06] GRZESCHIK, Marc: *Verbesserung des Lagenzusammenhaltes bei schichtweise aufgebauten Faserverbundwerkstoffen*, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, unveröffentl. Studienarbeit, März 2006
- [Gut97] GUTOWSKI, T. G.: *Advanced Composite Manufacturing*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [GZ03] GRASSI, Marcello ; ZHANG, Xiang: Finite element analyses of mode I interlaminar delamination in z-fibre reinforced composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 63 (2003), Nr. 12, 1815 - 1832. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00134-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00134-9). – DOI 10.1016/S0266-3538(03)00134-9. – ISSN 0266-3538
- [GZM02] GRASSI, M. ; ZHANG, X. ; MEO, M.: Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminates. In: *Composites Part A* 33 (2002), Nr. 12, S. 1653-1664. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00137-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00137-9). – DOI 10.1016/S1359-835X(02)00137-9. – ISSN 1359-835X
- [Hab06] HABENICHT, Dr. rer. nat. G.: *Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 5., erweiterte und aktualisierte Auflage. Berlin : Springer, 2006. – ISBN 3-540-26273-3 978-3-540-26273-2
- [Hal97] HALDENWANGER, Hans-Günther: *Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von PKW-Rohkarosserien*, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, Diss., Januar 1997



- [Hal06] HALDENWANGER, Prof.Dr. Hans-Günther: *Leichtbau und Recycling im Automobilbau*. Scriptum, Fakultät für angewandte Naturwissenschaften, Universität Bayreuth, 2006
- [Hav07] HAVAR, Thomas: *Beitrag zur Gestaltung und Auslegung von 3D-verstärkten Faserverbundschlaufen*. Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, Diss., Mai 2007
- [HBD<sup>+</sup>04] HAHN, Prof. Dr.-Ing. O. ; BYE, Dipl.-Ing. C. ; DRAHT, Dipl.-Ing. T. ; LÜBBERS, Dr. rer. nat. R. ; RUTHER, Dipl.-Ing M. ; ZILG, Dr. rer. nat. C. ; KÖNIG, Dr.-Ing G. ; KUBA, Dipl.-Ing. V. ; KÜTING, Dr.-Ing. J.: *FügeKunSt - Fügen von faserverstärkten Kunststoffen im strukturellen Leichtbau / Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)*. Paderborn : Eigenverlag Universität Paderborn, Mai 2004. – Forschungsbericht
- [Her04] HERMANN, Prof. Dr. A.: CFK-Komponenten im Flugzeug- und Automobilbau - Stückzahlen nähern sich an. In: *Automotive Materials* 02 (2004)
- [HS74] HART-SMITH, L. J.: Advances in the Analysis and Design of Adhesive-Bonded Joints in Composite Aerospace Structures. In: *SAMPE Process Engineering* 19 (1974), S. 722–737
- [HS03] HERBECK, Dr. L. ; SCHWEITZER, Dr. B.: Faserverbund Know-how aus der Luft- und Raumfahrt für die Automobilindustrie. In: *Zuliefererbörse: Vortragsreihe Werkstoffe/Fertigung*. Wolfsburg : HIGH-END Engineering GmbH, März 2003
- [HSL04] HAILER, Robert ; SEDELMAIER, Hermann ; LOHSE, Dr. H. ; SCHUMACHER, Roland: CFK-Dach M3 CSL - erfolgreiche Leichtbaustrategie dank Klebtechnik. In: *Adhaesion* 12 (2004)
- [INW09] IWAHORI, Yutaka ; NAKANE, Kozue ; WATANABE, Naoyuki: DCB test simulation of stitched CFRP laminates using interlaminar tension test re-

- sults. In: *Composites Science and Technology* In Press, Corrected Proof (2009), -. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.12.018>. – DOI 10.1016/j.compscitech.2008.12.018. – ISSN 0266–3538
- [ISO02] Norm ISO 6487 Oktober 2002. *Road vehicles - Measurement techniques in impact tests - Instrumentation*
- [JDM98] JAIN, Lalit K. ; DRANSFIELD, Kimberley A. ; MAI, Yiu-Wing: On the effects of stitching in CFRPs–II. Mode II delamination toughness. In: *Composites Science and Technology* 58 (1998), Nr. 6, 829–837. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00186-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00186-3). – DOI 10.1016/S0266–3538(97)00186–3. – ISSN 0266–3538
- [Joc09] JOCHEM, Sebastian: *Optimierung textiltechnisch verstärkter Mischverbindungen (Alu-CFK) mit Hilfe der FEM*. Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, Diplomarbeit, August 2009
- [JSF<sup>+</sup>04] JACOB, George C. ; STARBUCK, J. M. ; FELLERS, John F. ; SIMUNOVIC, Srdan ; BOEMAN, Raymond G.: Strain Rate Effects on the Mechanical Properties of Polymer Composite Materials. In: *Applied Polymer Science* 94 (2004), 296–301. <http://dx.doi.org/10.1002/app.20901>. – DOI 10.1002/app.20901
- [Köb06] KÖBER, Uwe: *Entwicklung eines Leichtbau-Fahrradsattels mit dem Fertigungsverfahren Tailored Fibre Placement*. Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB), Universität Stuttgart, unveröffentl. Studienarbeit, November 2006
- [KCPC00] KAMIYA, Ryuta ; CHEESEMAN, Bryan A. ; POPPER, Peter ; CHOU, Tsu-Wei: Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review. In: *Composites Science and Technology* 60 (2000), Nr. 1, 33–47. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00093-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00093-7). – DOI 10.1016/S0266–3538(99)00093–7. – ISSN 0266–3538

- [KEGZ08] KAISER, Oliver S. ; EICKENBUSCH, Heint ; GRIMM, Vera ; ZWECK, Axel: Zukunft des Autos / Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH. Düsseldorf, Januar 2008. – Forschungsbericht. – ISSN 1436–5928
- [Kei] KEILMANN SONDERMASCHINENBAU GMBH (KSL): *Nähetechnische Lösungen für Faserverbundwerkstoffe - Stitching solutions for Composites*. [http://www.ksl-lorsch.de/ksl-lorsch/pdf/kslcomposites\\_e.pdf](http://www.ksl-lorsch.de/ksl-lorsch/pdf/kslcomposites_e.pdf), Abruf: 13.05.2009. – Online Ressource
- [Kel05] KELLY, Godon: Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. In: *Composite Structures* 69 (2005), S. 35–43
- [KH04] KELLY, Gordon ; HALLSTROEM, Stefan: Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance. In: *Composites Part B* 35 (2004), August, Nr. 4, S. 331–343. – ISSN 1359–8368
- [KHF04] KOLESNIKOV, Boris ; HERBECK, Lars ; FINK, Axel: Fortschrittliche Verbindungstechniken von Faserverbundstrukturen. In: RAUMFAHRT DGLR, Deutsche G. (Hrsg.): *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2004* Bd. II, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt DGLR, 20.-23.September 2004. – ISSN 0700–4083, 1419–1428
- [KHF07] KOLESNIKOV, Boris ; HERBECK, Lars ; FINK, Axel: CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints. In: *Composites Structures* 83 (2007), Juni, Nr. 83, S. 338–380. – ISSN 1359–8368
- [KJK<sup>+</sup>06] KWEON, Jin-Hwe ; JUNG, Jae-Woo ; KIM, Tae-Hwan ; CHOI, Jin-Ho ; KIM, Dong-Hyun: Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. In: *Composite Structures* 75 (2006), S. 192–198

- [KPH00] KLEINEBERG, M. ; PABSCH, A. ; HERRMANN, A.S.: Kostengünstige Faser-verbundstrukturen - eine Frage neuer Produktionsansätze. In: *3. AVK-TV Tagung*. Baden-Baden, 12.-13. September 2000, (C4) 1–(C4) 11. – LIDO-Berichtsjahr=2001,;
- [Kör02] KÖRWIEN, Thomas: *Konfektionstechnisches Verfahren zur Herstellung von endkonturnahen textilen Vorformlingen zur Versteifung von Schalensegmenten*. Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Universität Bremen, Diss., September 2002
- [Lar97] LARSSON, Fritz: Damage tolerance of a stitched carbon/epoxy laminate. In: *Composites Part A* 28A (1997), S. 923–934
- [LT07] LUO, Quanain ; TONG, Liyong: Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints. In: *Solids and Structures* 44 (2007), S. 2349–2370
- [MLH97] MOURITZ, A. P. ; LEONG, K. H. ; HERSZBERG, I.: A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28 (1997), Nr. 12, 979–991. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(97\)00057-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(97)00057-2). – DOI 10.1016/S1359-835X(97)00057-2. – ISSN 1359-835X
- [OLS00a] OWENS, James F. ; LEE-SULLIVAN, Pearl: Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints I. Theoretical model. In: *Adhesion & Adhesives* 20 (2000), S. 39–45
- [OLS00b] OWENS, James F. ; LEE-SULLIVAN, Pearl: Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints II. Experimental. In: *Adhesion & Adhesives* 20 (2000), S. 47–58
- [Ost07] OSTERMANN, Friedrich: *Anwendungstechnologien Aluminium*. 2. Auflage. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-71196-4

- [PC05] PARTRIDGE, Ivana K. ; CARTIÉ, Denis D.: Delamination resistant laminates by Z-Fiber® pinning: Part I manufacture and fracture performance. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36 (2005), 55–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.06.029>. – DOI 10.1016/j.compositesa.2004.06.029. – ISSN 1359–835X
- [PFB<sup>+</sup>05] PHARISS, Molly K. ; FLINN, Brian D. ; BALLIEN, Bjorn ; GRACE, William ; VANVOAST, Peter J.: Evaluation of Peel-Ply Materials on composite Bond Quality. In: *37th ISTC*. Seattle, WA : Sampe, 31. Oktober - 3. November 2005
- [PG05] PICKETT, Anthony K. ; GREVE, Lars: Delamination testing and modelling for composite crash simulation. In: *Composites Science and Technology* 66 (2005), 816–826. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.12.042>. – DOI 10.1016/j.compscitech.2004.12.042. – ISSN 0266–3538
- [Pic02] PICKETT, A. K.: Review of Finite Element Simulation Methods Applied to Manufacturing and Failure Prediction in Composites Structures. In: *Applied Composite Materials* 9 (2002), S. 43–58
- [Pië06] PIËCH, Prof. Dr. Ferdinand K.: *Innovationsmanagement - Entwicklungen, Prozesse, Erfolgsfaktoren*. Scriptum, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien, 2006
- [Pot97] POTTER, Kevin: *Resin Transfer Moulding*. London : Chapman & Hall, 1997. – ISBN 0–412–72570–3
- [Qui07] QUITTER, Dorothee: *Leichtbau durch Mischbauweise, neue Strukturkonzepte und angepasste Fügeverfahren*. Version: 06. Juli 2007. <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/werkstoffe/metalle/articles/114141/>, Abruf: 14.04.2009. – Online Ressource

- [Ram04] RAMMINGER, Erik: *Datenbankgestützte Fügestellenanalyse*. Dresden, Lehrstuhl Fügetechnik und Montage, Institut für Produktionstechnik, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, Großer Beleg, Februar 2004. – unveröffentlicht
- [Rie03] RIEDEL, Frank ; METTHES, Klaus-Jürgen (Hrsg.): *Fügetechnik*. Leipzig : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003. – 324 S. – ISBN 3-446-22133-6 978-3-446-22133-8
- [Sch07] SCHÜRMAN, Prof. Dr.-Ing. H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-72189-5
- [SF06] STEEVES, Craig A. ; FLECK, Norman A.: In-plane properties of composite laminates with through-thickness pin reinforcement. In: *International Journal of Solids and Structures* 43 (2006), Nr. 10, 3197 - 3212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.05.017>. – DOI 10.1016/j.ijsolstr.2005.05.017. – ISSN 0020-7683
- [SKN<sup>+</sup>08] SEONG, Myeong-Su ; KIM, Tae-Hwan ; NGUYEN, Khanh-Hung ; KWEON, Jin-Hwe ; CHOI, Jin-Ho: A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum. In: *Composite Structures* 86 (2008), S. 135–145
- [SMF<sup>+</sup>06] SCHALLABÖCK, Karl O. ; MERTEN, Frank ; FISCHEDICK, Manfred ; OTT, Hermann E. ; BROUNS, Bernd ; PASTOWSKI, Andreas ; LUHMANN, Hans-Jochen ; VENJAKOB, Jphannes: Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs. In: *Wuppertal Spezial*. Wuppertal : Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, November 2006. – ISBN 3-929944-72-3 978-3-929944-72-3
- [SWH<sup>+</sup>00] SICKINGER, C. ; WILMES, H. ; HERBECK, L. ; HERRMANN, A. S. ; KÖHNKE, B. ; WOCKATZ, R.: Strukturelles Nähen, eine Maßnahme zur Realisie-

- rung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen. In: RAUMFAHRT (DGLR), Deutsche G. (Hrsg.) ; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Veranst.): *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress/DGLR-Jahrestagung, Leipzig, 18.-21.09.2000* Bd. 2 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fa. R. Thierbach GmbH, 2000. – ISSN 0070–4083, 1–10. – LIDO-Berichtsjahr 2001, monograph id DGLR-JT 2000-42
- [TJWC08] TAO, Yongqiang ; JIAO, Guiqiong ; WANG, Bo ; CHANG, Yanjun: Effect of Z-pins' diameter, spacing and overlap length on connecting performance of CMC single lap joint. In: *Acta Mechanica Solida Sinica* 21 (2008), Nr. 5, 461 - 471. <http://dx.doi.org/10.1007/s10338-008-0856-8>. – DOI 10.1007/s10338-008-0856-8. – ISSN 0894–9166
- [Tro03] TROULIS, Emmanouil: *Effect of Z-Fibre pinning on the mechanical properties of carbon fibre-epoxy composites*. Cranfield, Cranfield University, School of Applied Sciences (SAS), Diss., Oktober 2003
- [US 02] US ARMY RESEARCH LABORATORY WEAPONS & MATERIALS RESEARCH DIRECTORATE: *Composite Materials Handbook*. Juni 2002. (MIL-HDBK-17)
- [VDI04] Norm VDI 2232 Januar 2004. *Methodische Auswahl fester Verbindungen - Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen*
- [VPSW07] VERDIERE, Mathieu C. ; PICKETT, Anthony K. ; SOKORDOS, Alex A. ; WITZEL, Volker: Effect of Tufting on the Response of Non Crimp Fabric Composites. In: *ECCOMAS Thematic Conference on Material Response of Composites*. Porto, Portugal, 12-14 September 2007
- [WF96] WITKE, Klaus ; FÜSSEL, Uwe: *Kombinierte Fügeverbindungen*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 1996. – ISBN 3–540–54469–0

- [Wit01] WITTING, Jürgen: Recent development in the roboticstitching Technology for textile structural Composites. In: *Journal of textile and apparels, Technology and Management (JTATM)* 2 (2001), S. 1–8
- [YK00] YOON, K. J. ; KIM, Ju-Sik: Prediction of Thermal Expansion Properties of Carbon/Epoxy Laminates for Temperature Variation. In: *Journal of Composite Materials* 34 (2000), Februar, 90–100. <http://dx.doi.org/10.1177/002199830003400201>. – DOI 10.1177/002199830003400201
- [Zha08] ZHAO, Nuoping: *Nähen als Montageverfahren textiler Preforms und Wirkungen der Nähte auf lokale mechanische Eigenschaften thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe*, Fakultät Maschinenwesen, Technischen Universität Dresden, Diss., Dezember 2008

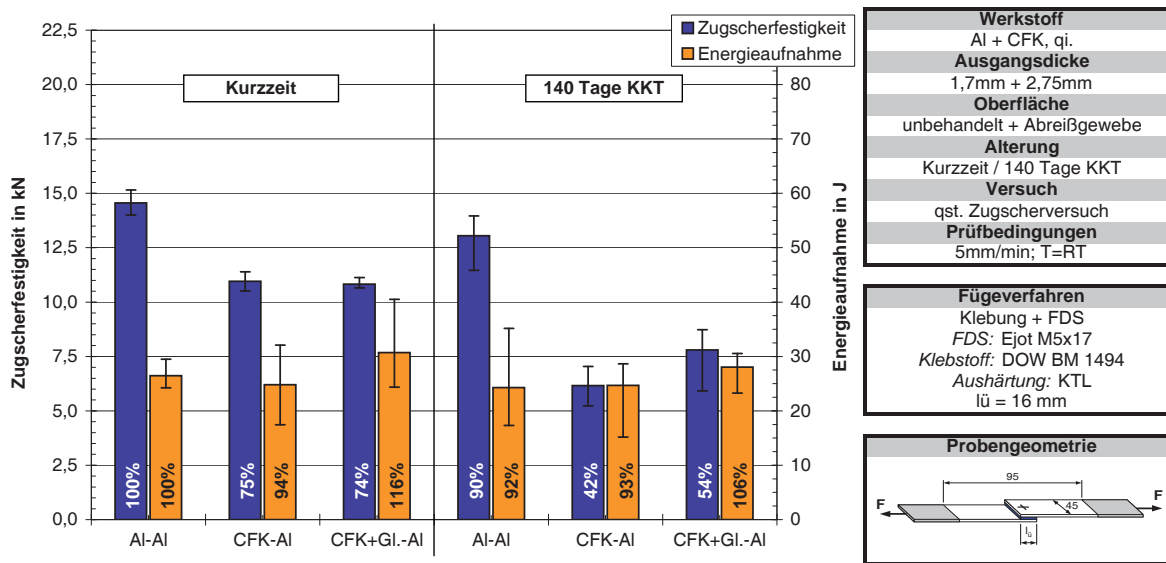






# Anhang

## A.1 Versuchsergebnisse der FDS-Klebung: FDSK,K



<b>Werkstoff</b> Al + CFK, qi.
<b>Ausgangsdicke</b> 1,7mm + 2,75mm
<b>Oberfläche</b> unbehandelt + Abreibgewebe
<b>Alterung</b> Kurzzeit / 140 Tage KKT
<b>Versuch</b> qst. Zugscherversuch
<b>Prüfbedingungen</b> 5mm/min; T=RT

<b>Fügeverfahren</b> Klebung + FDS
<b>FDS:</b> Ejot M5x17
<b>Klebstoff:</b> DOW BM 1494
<b>Aushärtung:</b> KTL lü = 16 mm

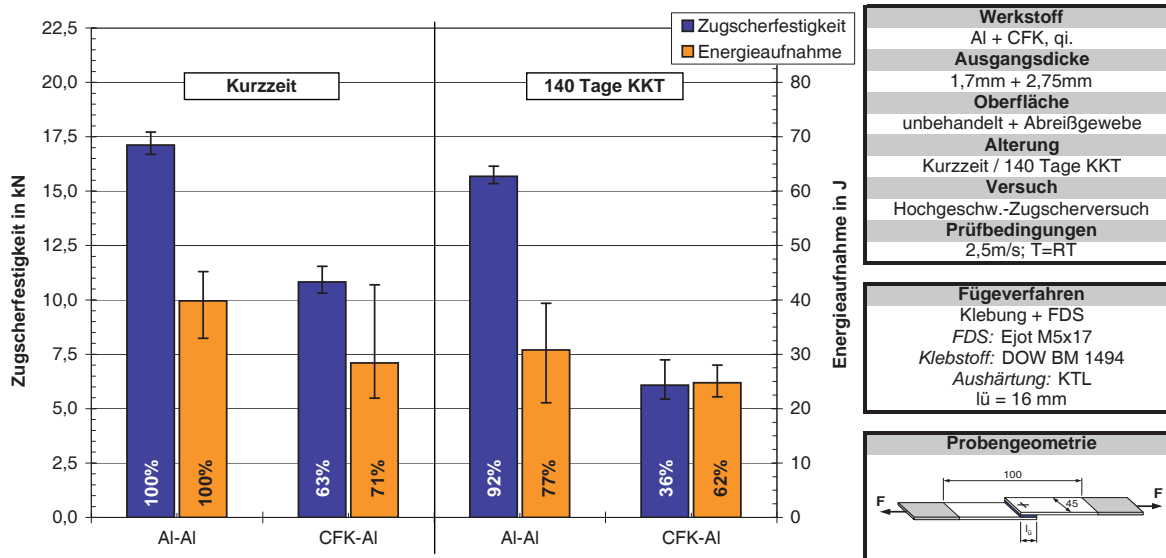
  

<b>Probengeometrie</b>

Abb. A.1: Ergebnisse quasistatischer Zugscherversuche der FDS-Klebung

Fügung im Karosseriebau

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme



<b>Werkstoff</b> Al + CFK, qi.
<b>Ausgangsdicke</b> 1,7mm + 2,75mm
<b>Oberfläche</b> unbehandelt + Abreibgewebe
<b>Alterung</b> Kurzzeit / 140 Tage KKT
<b>Versuch</b> Hochgeschw.-Zugscherversuch
<b>Prüfbedingungen</b> 2,5m/s; T=RT

<b>Fügeverfahren</b> Klebung + FDS
<b>FDS:</b> Ejot M5x17
<b>Klebstoff:</b> DOW BM 1494
<b>Aushärtung:</b> KTL lü = 16 mm

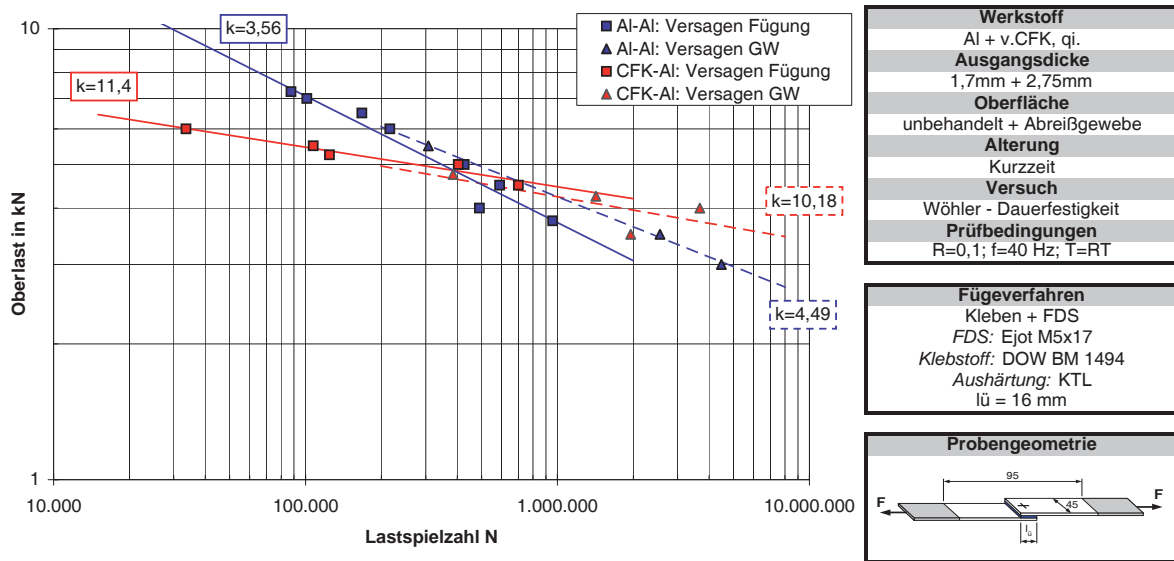
  

<b>Probengeometrie</b>

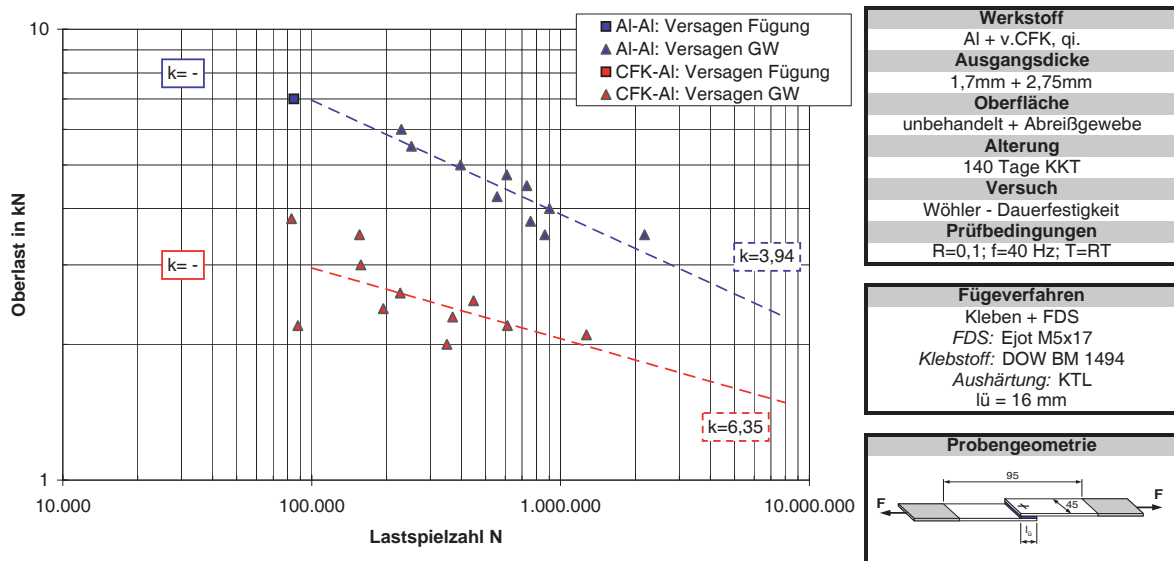
Abb. A.2: Ergebnisse schlagartiger Zugscherbelastung der FDS-Klebung

Fügung im Karosseriebau

**blau:** Zugscherfestigkeit; **orange:** Energieaufnahme



(a) Wöhlerlinien, Kurzzeit



(b) Wöhlerlinien, 140 Tage KKT

Abb. A.3: Wöhlerlinien der FDS-Klebung

Fügung im Karosseriebau

**blau:** Al-Al; **rot:** CFK-AL;

□ Versagen der Fügung; △ Versagen im Grundwerkstoff (GW)

## A.2 Probengeometrien

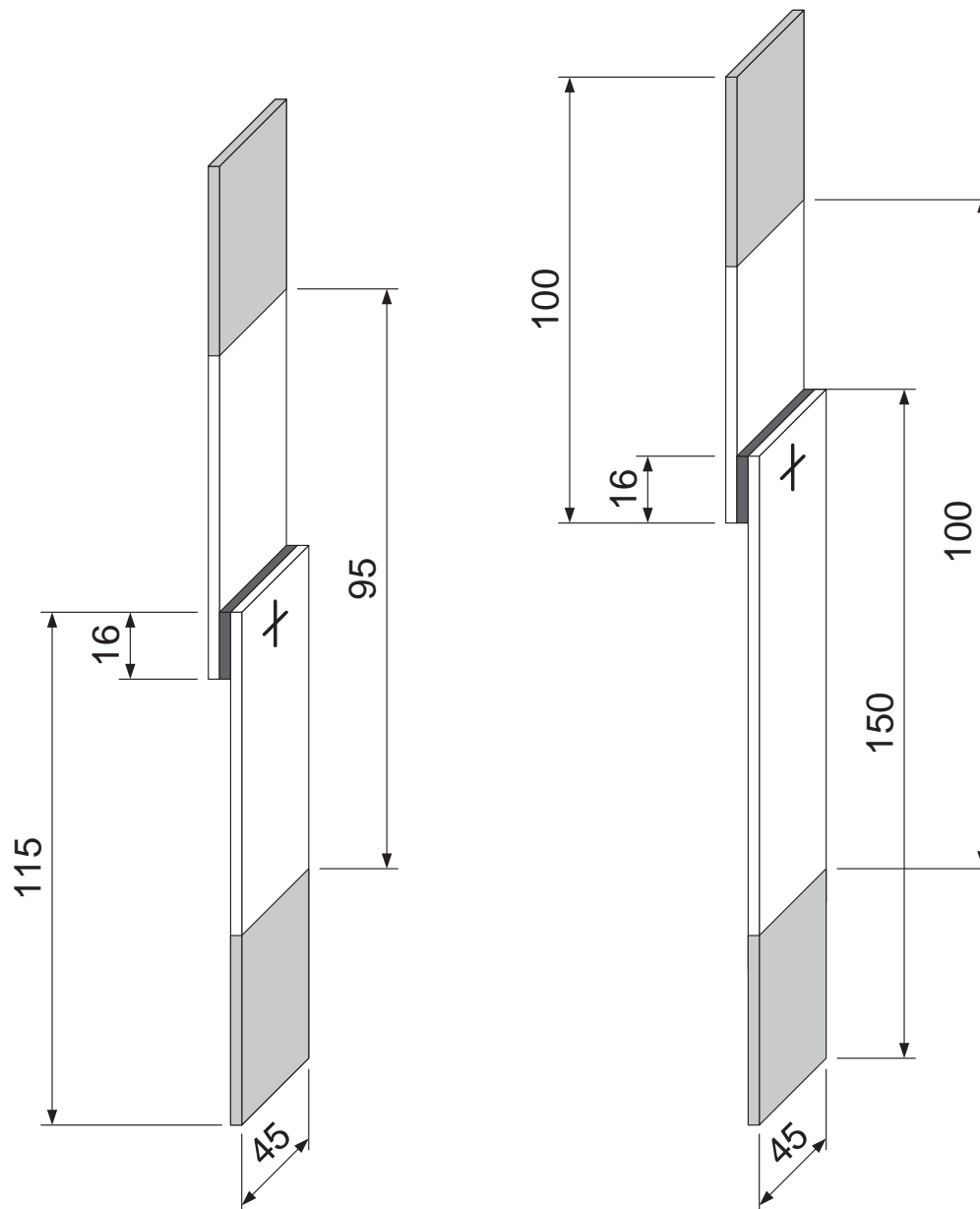
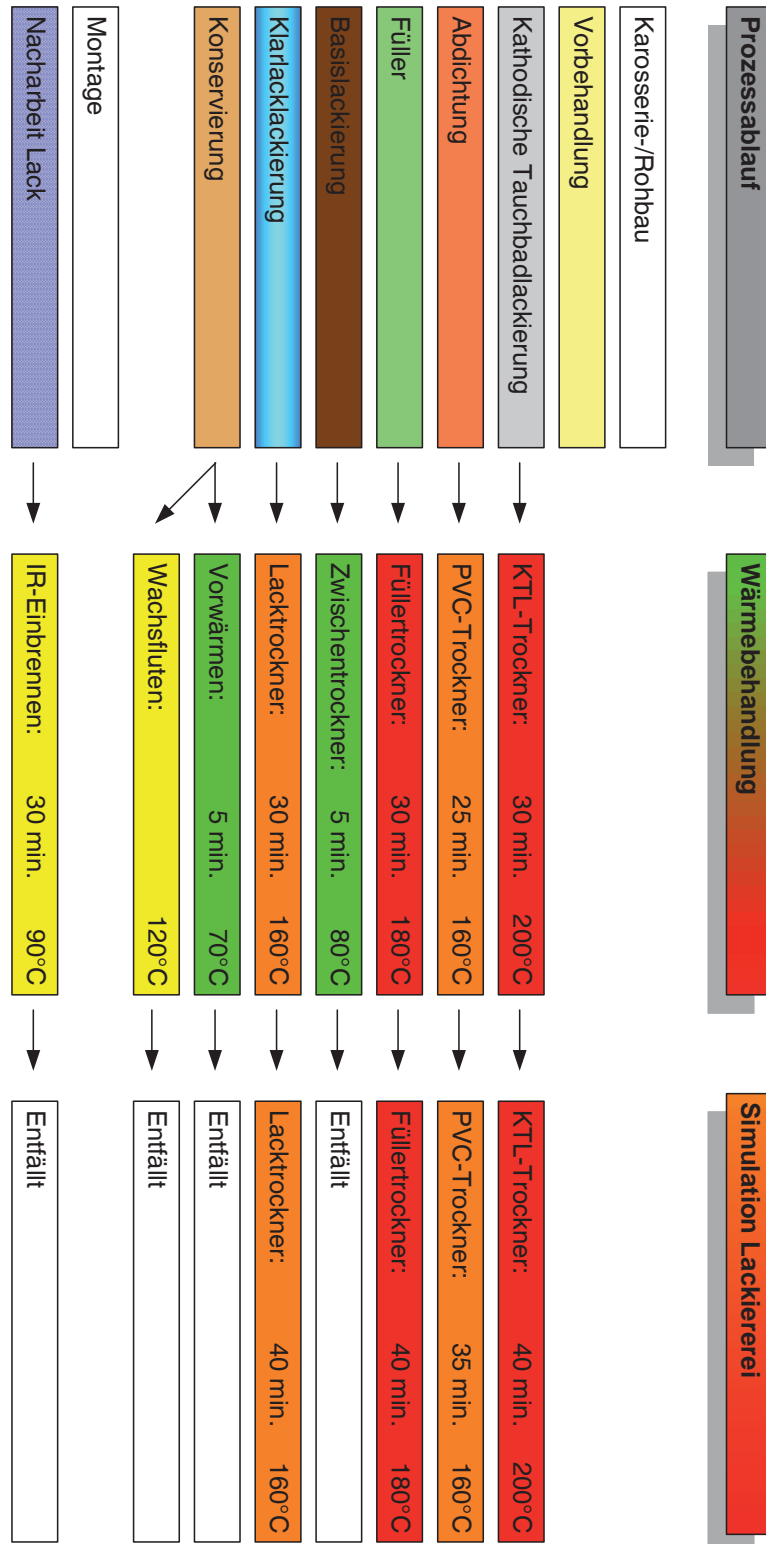


Abb. A.4: links: quasistatische und dynamisch belastete Versuche  
rechts: Hochgeschwindigkeitszugscherversuche (HZV)

### A.3 Simulation der Lackierprozesse (simLack)



**Felix Ulrich Beck**

Dipl. Ingenieur

\*30. Nov. 1979 in Beckum, deutsch

- 1999** Abitur am Gymnasium St. Michael, Ahlen (Westf.)
- 1999 - 2000** Wehrdienst in der Fallschirmjägertruppe, Oldenburg (Oldb.)
- 2000** zweimonatiges Grundpraktikum bei der Firma Miele, Warendorf
- ab 2000** Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart
- 2001** Weiterbildung zum Unteroffizier d. R.
- ab 2004** Vertiefungsrichtungen im Studium am „Institut für Aero- und Gasdynamik“ (IAG) und am „Institut für Statik und Dynamik“ (ISD)
- 2005** Studienarbeit, Thema: „Auslegung eines hydro-dynamischen Jetantriebes“ anhand des „Seabob“ der Firma Cayago, Stuttgart
- 2005 - 2006** Diplomarbeit, Thema: „Structural Health Monitoring (SHM) of Scarf Joints“ am „Cooperative Research Centre – Advanced Composite Structures“ (CRC-ACS), Melbourne (Australien)
- 17.02.2006** Abschluss: Diplomingenieur Luft- und Raumfahrttechnik
- 2006 - 2008** Weiterbildung zum Reserveoffizier; Beförderung zum Leutnant d.R.
- 2006 - 2009** Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart in Kooperation mit der Audi AG im Rahmen des Programms der „Hochschulinstiute Neckarsulm“ (HIN)
- seit 2009** Entwicklungsingenieur im Bereich „Mechanical, Thermal, Analysis and Test“ der EADS Astrium GmbH, Astrium Satellites, Immenstaad





