

# **Lösbare kraftschlüssige Verbindungen für modulare Bauwerke aus Faserverbundkunststoffen**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

**Bauhaus-Universität Weimar**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Stefan Linne**

Weimar, 2010

Gutachter

1. Prof. Dr. Ing. Jürgen Ruth
2. Prof. Dr. Ing. Dipl. Chem. Andrea Dimmig-Osburg
3. Prof. Dr. Ing. Jan Knippers

Tag der Disputation: 08.02.2010

## **Kurzfassung**

In der vorliegenden Arbeit wird eine kraftschlüssige Verbindungstechnik für modulare, schalenartige Faserverbundbauteile vorgestellt. Die Verbindung basiert auf der Verklebung mit lokal begrenzten Stahlblechen. Aus dem Verbindungsansatz wird die Verklebung zwischen Stahl und Faserverbundkunststoff vertiefend betrachtet. Ziel sind die Wahl von technologischen Randbedingungen, die Erarbeitung eines Vorschlages zur numerischen Berechnung und Bemessung und die Formulierung konstruktiver Empfehlungen zum Entwurf von Verklebungen. Mechanische Kennwerte werden in Zugversuchen ermittelt und direkt auf die nichtlinearen Berechnungen übertragen. Technologische Einflüsse und die Streuungen aus realen Verklebungen werden über die Nachrechnung von Zugscherversuchen in die Bemessung integriert. Es wird gezeigt, dass die Verklebungen ausreichende Festigkeiten und ein zufriedenstellendes Bruchverhalten aufweisen. Die Kombination aus einer Werkstattverklebung und einer baustellengerechten Montage ermöglicht eine materialgerechte und effiziente Verbindungen für Faserverbundkonstruktionen unter den Randbedingungen des Bauwesens.

## **Abstract**

In this thesis, a force-fit joining technology for modular, shell-like fiber reinforced polymer structures is presented. The connection is based on a local reinforcement with steel sheets with an adhesive bonding to the polymer. The focus of this work is to investigate the adhesive bonding between steel and fiber reinforced polymers. A general concept for the selection of technological constraints as well as suggestions for the numerical analysis and recommendations for the engineering design of the connections are developed. The mechanical properties are experimentally terminated by tensile tests. These results were directly incorporated into the nonlinear numerical analysis. Parameters describing technological influences and the stochastic scatter of real bondings were integrated into the analysis by fitting numerical simulations with the experimental data. It is demonstrated that the bondings have a sufficient strength as well as a satisfactory fracture behavior. Furthermore, it is shown that the combination between an adhesive bonding realized off-site and a robust on-site assembly enables the construction of reliable and efficient joints that take into account the specific constraints on a construction site.

## Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. J. Ruth an der Bauhaus-Universität Weimar, zunächst in der Forschungsgruppe für materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren mit Faserverstärkten Kunststoffen (FOMEKK) und anschließend an der Professur Massivbau II.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Ing. J. Ruth für die stetige Förderung und Unterstützung der Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates. Das vertrauensvolle Verhältnis über all die Jahre habe ich sehr geschätzt, wobei mich seine Persönlichkeit vorbildhaft und vielschichtig geprägt hat.

Herrn Prof. Dr. Ing. Jan Knippers danke ich für die Übernahme des Coreferates und die Hinweise und Anregungen zur praktischen Relevanz der Arbeitsergebnisse, die mir halfen die Arbeit konsequent zum Abschluss zu bringen.

Frau Prof. Dr. Ing. Dipl. Chem. Andrea Dimmig-Osburg danke ich ebenfalls für die Übernahme des Koreferates, die sehr genaue Durchsicht der Arbeit und die fachlichen Anregungen zu den werkstoffbezogenen Fragen. Durch die Unterstützung Ihres Fachbereiches konnte erst die hohe Anzahl an Substanzproben entstehen und eine Vielzahl der ersten Versuche durchgeführt werden. Insbesondere Herrn Dr. Ing. Kay Andre Bode gebührt mein Dank für viele Stunden an der Prüfmaschine.

Herrn Dr. Ing. Rayk Thumser möchte ich für die breitgefächerten Anregungen zu Statistik, FEM und zur Ergebnisauswertung und das beständige Drängen zur Fertigstellung der Arbeit von Herzen danken. Als Freund und Vorgesetzter in meiner derzeitigen Anstellung bei der MFPA Weimar verdanke ich ihm mehr als sich an dieser Stelle in Worte fassen lässt. An der MFPA möchte ich Herrn Prof. Dr. Ing. J. Bergmann für Anregungen aus seinem Erfahrungsschatz und die Bereitstellung sämtlicher Prüftechnik aufrichtig danken. Den Kollegen in der MFPA Dr. Ing. U. Gerth, Dipl.-Ing. A. Krauß, Frau Kretschmar und Herrn Berbig gebührt mein Dank für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Außerdem wurden Versuche an der Versuchstechnischen Einrichtung der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Dafür möchte ich mich stellvertretend bei Herrn Dipl.-Ing. W.-D. Vogler und bei Herrn H. Dabbert bedanken.

Von den ehemaligen Studenten und Diplomanten des Lehrstuhls Massivbau II möchte ich für ihre Hilfe an dieser Arbeit danken: Herrn Dipl.-Ing. Mario Rinke für ein kompliziertes FEM-Modell, Herrn Dipl.-Ing. Uwe Müller für seine Hilfe bei Probenfertigung und Versuchsdurchführung, Herrn Dipl.-Ing. Christian Dorn für eine Vielzahl von Versuchen und deren Auswertung in einer Diplomarbeit und Frau Dipl.-Ing. Maria Schwendel für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Meinem Freund Dipl.-Ing. Heiko Beinersdorf danke ich für seine ausdauernde Geduld beim Beheben von Problemen beim Textsatz. Für die Korrekturlesung gebührt mein herzlicher Dank Ria Krüger.

Den Klebstoffherstellern Sika, 3M und UHU danke ich für die Bereitstellung von Probenmaterial.

Meiner lieben Frau Katrin und den Kindern Martin und Georg danke ich für ihre beharrliche Ausdauer, die Geduld und die ungezählten Stunden des Verzichtens. Meinen Eltern danke ich zu tiefst für die Unterstützung auf dem jahrelangen Weg meiner Ingenieurausbildung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>1 Einleitung und Zielstellung</b>	<b>15</b>
<b>2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen</b>	<b>17</b>
2.1 Fasern . . . . .	17
2.2 Harzsysteme . . . . .	18
2.3 Konstruktionsweisen für FVK . . . . .	18
2.4 Flächige Tragwerke aus FVK . . . . .	21
2.5 Herstellungsverfahren für große Bauteile aus FVK . . . . .	26
2.6 Fugen von montierten Faserverbundkonstruktionen . . . . .	28
2.7 Bolzen-, Niet- und Durchsteckverbindungen . . . . .	29
2.8 Bänderschlaufen . . . . .	34
2.9 Verkleben faserverstärkter Kunststoffe . . . . .	37
2.9.1 Klebsysteme . . . . .	37
2.9.2 Haftung . . . . .	45
2.9.3 Oberflächenbehandlungen . . . . .	47
2.9.4 Beanspruchungen und Konstruktion einer Verklebung . . . . .	50
2.9.5 Versagensformen . . . . .	60
<b>3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche</b>	<b>62</b>
3.1 Problemdarstellung . . . . .	62
3.2 Die Technologie einer lösbaren materialgerechten Verbindung . . . . .	63
3.3 Fugenausbildung für Kraft- und Formschluss . . . . .	67
3.4 Referenzen für die Verbindungslösung . . . . .	68
3.4.1 Experimentalbau MYKO . . . . .	68
3.4.2 Chanel - Exhibition Pavillon . . . . .	71
3.5 Kleben von Stahl und FVK . . . . .	73
3.5.1 Oberflächenvorbereitung von Stahlblechen . . . . .	73
3.5.2 Tragverhalten von Metall-Kunststoff-Verklebungen . . . . .	74
3.5.3 Geometrieinflüsse auf die Tragfähigkeit der Klebverbindung . . . . .	77

<b>4 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>80</b>
4.1 Statistische Auswertung von Versuchsergebnissen . . . . .	80
4.2 Bauteilähnliche Versuche an geklebten Stahlanschlussblechen . . . . .	84
4.2.1 Vorbemerkungen und Randbedingungen . . . . .	84
4.2.2 Probengeometrie, Werkstoffe und Probenbezeichnung . . . . .	84
4.2.3 Probenherstellung . . . . .	89
4.2.4 Versuchsdurchführung . . . . .	90
4.2.5 Ergebnisse . . . . .	92
4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben . . . . .	95
4.3.1 Vorbemerkungen und Randbedingungen . . . . .	95
4.3.2 Werkstoffe der Fügepartner und Klebstoffe . . . . .	96
4.3.3 Probengeometrie . . . . .	99
4.3.4 Oberflächenvorbereitung . . . . .	100
4.3.5 Probenbezeichnung und Probenumfang . . . . .	102
4.3.6 Probenherstellung und Handhabung der Klebstoffe . . . . .	104
4.3.7 Versuchsdurchführung . . . . .	107
4.3.8 Versuchsergebnisse . . . . .	108
4.4 Zugversuche an Substanzproben . . . . .	116
4.4.1 Vorbemerkungen . . . . .	116
4.4.2 Probengeometrie . . . . .	119
4.4.3 Verwendete Werkstoffe und deren Probenbezeichnung . . . . .	119
4.4.4 Versuchsdurchführung . . . . .	120
4.4.5 Ergebnisse . . . . .	122
4.4.6 Zusammenfassung zu den experimentellen Untersuchungen . . . . .	130
<b>5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen</b>	<b>132</b>
5.1 Aktueller Forschungsstand und Bezug auf durchgeführte Analysen . . . . .	132
5.2 FE-Modellierung der Zugscherversuche . . . . .	135
5.2.1 Geometrie . . . . .	136
5.2.2 Material . . . . .	136
5.2.3 Element- und Netzauswahl . . . . .	137
5.2.4 Randbedingungen und Lasten . . . . .	138
5.2.5 Ergebnisse Modell Zugscherversuch . . . . .	139
5.2.5.1 Zugschermodell DP490-12E . . . . .	141
5.2.5.2 Zugschermodell SI330-12E . . . . .	143
5.2.5.3 Zugschermodell DP490-24E . . . . .	145
5.2.5.4 Zusammenfassung Zugschermodelle . . . . .	146

5.3	FE-Modell eines realitätsnahen Kraftanschlusspunktes . . . . .	148
5.3.1	Geometrie des Anschlusspunktes . . . . .	148
5.3.2	Modellbeschreibung zum Kraftanschlusspunkt . . . . .	151
5.3.3	Ergebnisdarstellung Variantenuntersuchung . . . . .	153
5.3.4	Bewertung Variantenuntersuchung . . . . .	161
5.3.5	Entwicklung Kombinationsmodell . . . . .	161
5.3.6	Bewertung Kombinationsmodell . . . . .	162
<b>6</b>	<b>Ableitung eines ingenieurmäßigen Bemessungsvorschlags</b>	<b>166</b>
6.1	Ingenieurmäßige Bemessung des Kraftanschlusspunktes . . . . .	166
6.2	Übersicht zum Bemessungsablauf . . . . .	171
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>174</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	174
7.2	Ausblick . . . . .	176
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>177</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>184</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>194</b>
	<b>Anhang</b>	<b>196</b>
<b>A</b>	<b>Versuchsdaten bauteilähnlicher Versuche</b>	<b>196</b>
<b>B</b>	<b>Mechanische Kennwerte aus Hersteller- bzw. Literaturangaben</b>	<b>214</b>
<b>C</b>	<b>Abbildungen zu den Zugversuchen an Substanzproben</b>	<b>216</b>
<b>D</b>	<b>Materialkennwerte für die FEM-Berechnungen</b>	<b>223</b>
<b>E</b>	<b>Abbildungen zu den Berechnungen an Zugscherversuchen</b>	<b>227</b>
<b>F</b>	<b>Abbildungen zu den Berechnungen an der Bauteilgeometrie</b>	<b>234</b>
<b>G</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>246</b>

# Symbolverzeichnis

## Indices

$A$	Fläche
$A_0$	Ausgangsquerschnittsfläche
$A_1, A_2, A_3$	Abminderungsfaktoren im Teilsicherheitskonzept
$A_{ges}$	Produkt der Abminderungsfaktoren im globalen Sicherheitskonzept
$A_T, A_{st}, A_{dyn}, A_A$	Abminderungsfaktoren im globalen Sicherheitskonzept
$A_{kleb}$	Klebefläche
$\alpha_t$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$A_{mod}$	Produkt der Abminderungsfaktoren im Teilsicherheitskonzept
$b$	Klebefugenbreite
$d$	Klebschichtdicke, Durchmesser
$EA$	Dehnsteifigkeit
$E_d$	Designwert einer Einwirkungsgröße
$R_d$	Designwert einer Beanspruchbarkeit
$R_{k0,05}$	charakteristischer 5 %- Quantilwert einer Beanspruchbarkeit
$EI$	Biegesteifigkeit
$\varepsilon$	Dehnung
$\varepsilon_B$	Bruchdehnung nach DIN EN ISO 527 [1]
$\varepsilon_M$	Dehnung bei Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 527 [1]
$E_t$	Elastizitätsmodul aus Zugversuch; Zugmodul nach DIN EN ISO 527 [1]
$E_x, E_y, E_z$	Elastizitätsmoduli in den lokalen Koordinatenrichtungen

$F$	Kraft
$F_B$	Bruchkraft der Klebeverbindung
$F_b$	Korrekturfaktor der Standardabweichung der Normalverteilung
$F_{k0,05}$	charakteristischer 5% - Quantilwert der Bruchkraft
$F_{max}$	maximale Kraft bei Erreichen eines Grenzkriteriums
$F_x, F_y, F_z$	Kräfte in den lokalen Koordinatenrichtungen
$F_{zul}$	zulässige Bemessungslast im globalen Sicherheitskonzept
$G$	Schubmodul, Gleitmodul
$\tan\gamma$	elastische Winkelverformung (Gleitung)
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert des Materials
$G_k$	Schubmodul, Gleitmodul der Klebschicht
$G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$	Schubmoduli in den Raumebenen
$J_1$	erste Invariante des Spannungstensors
$J_2'$	zweite Invariante des Spannungsdeviators
$k_s$	Quantilfaktoren
$\Delta L$	Längenänderung
$L_0$	Ausgangsmesslänge
$l_{\ddot{u}}$	Überlappungslänge
$m$	Schätzwert des Mittelwertes der Grundgesamtheit
$\mu$	Mittelwert der Grundgesamtheit der Normalverteilung
$n$	Spannungsspitzenfaktor, Stichprobenumfang
$\nu$	Poissonzahl, Querkontraktionszahl, Querdehnzahl
$P$	Wahrscheinlichkeit
$\phi$	Faservolumenanteil
$\varphi_0(u)$	Dichtefunktion der Standard-Normalverteilung
$\varphi(x, \mu, \sigma)$	Dichtefunktion der Normalverteilung

## Symbolverzeichnis

$\phi(u)$	Verteilungsfunktion der Normalverteilung
$\phi_0(u)$	Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung
$\phi(u_p)$	Funktionswert der Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung für den Fraktilenwert
$\psi$	Glasmassenanteil
$R_m$	Zugfestigkeit
$\rho$	Dichte
$\rho_F$	Dichte der Fasern
$\rho_M$	Dichte der Matrix
$R_{p0,2}$	Fließspannung
$R_{p1}$	Fließspannung bei 1 % plastischer Dehnung
$S$	globaler Sicherheitsfaktor
$s$	Schätzwert der Standardabweichung der Normalverteilung
$s^2$	Schätzwert der Varianz der Normalverteilung
$\sigma$	Spannung
$\sigma$	Standardabweichung der Grundgesamtheit der Normalverteilung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
$\sigma_B$	Bruchfestigkeit nach DIN EN ISO 527 [1]
$\sigma_M$	Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 527 [1]
$\sigma_{ref}$	Referenzspannung im GFK
$\sigma_v$	Vergleichsspannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Spannungen in den Koordinatenrichtungen
$\sigma_{ZB}$	Zugbruchspannung
$s_{ij}$	Spannungsdeviator
$t$	Probendicke
$\tau_B$	Schubbruchspannung

$\tau_b$	Klebfestigkeit nach DIN EN 1465 [2]
$\tau_{Bmax}$	maximale Schubspannung der Klebschicht am Überlappungsende im Bruchzustand
$\tau_{kleb}$	rechnerische Schubspannung der Klebschicht
$\tau_m$	mittlere Schubspannung in der Klebschicht
$\tau_{max}$	maximale Schubspannung der Klebschicht am Überlappungsende
$\tau_v$	schubbasierte Vergleichsspannung
$\tau_{xy}$	Schubspannung in der x-y-Ebene
$T_g$	Glasübergangstemperatur
$t_k, t_{kleb}$	Klebschichtdicke
$u_p$	Fraktilwert (Quantil) der Standard-Normalverteilung
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert
$x$	Zufallsgröße
$x_{0,05}$	5 %- Quantilwert der Stichprobe
$x_p$	Schätzwert des Quantils der Zufallsgröße $x$
$u_x, u_y, u_z$	Verschiebungen in den lokalen Koordinatenrichtungen

## Abkürzungen

1.4301	Edelstahl X5CrNi 18 10
1K-PUR	Einkomponenten-Polyurethan
2K-PUR	Zweikomponenten-Polyurethan
AF	Adhäsionsbruch
AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
CF	Kohäsionsbruch im Klebstoff
CFK	kohlefaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computerized Numerical Control

## Symbolverzeichnis

CSF	kohäsives Fügegliedversagen
DF	Delaminierbruch
DP490	3M Scotch-Weld DP490 [3]
EP	Epoxid
FVK	Faserverbundkunststoff, faserverstärkter Kunststoff
GF-UP	glasfaserverstärktes ungesättigtes Polyesterharz
GFK.0	GFK-Probe in 0°-Richtung des Laminates
GFK.45	GFK-Probe in 45°-Richtung des Laminates
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GUP	glasfaserverstärktes ungesättigtes Polyesterharz
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
HM	High Modulus
HP	Hypar(schale)
HT	High Tension
MA	UHU plus multifest [4]
MFGPA	Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
NL	nichtlinear
NV	Normalverteilung
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Sikabond-T14 [5]
PVDF	Polyvinylidenfluorid
r. L. F.	relative Luftfeuchte
SCF	substratnaher Kohäsionsbruch im Klebstoff

SI30	Sikadur-30 [6]
SI31	Sikadur-31 CF-Normal [7]
SI330	Sikadur-330 [8]
UHM	Ultra High Modulus
UP	ungesättigtes Polyester allg. bzw. Laminierharz VIAPAL UP 242 BMT/57
VAR01...10	Berechnungsvarianten 1 bis 10
VTE	Versuchstechnische Einrichtung der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar



## 1 Einleitung und Zielstellung

Faserverstärkte Kunststoffe sind die Exoten unter den Baumaterialien. Neben hohen Zugfestigkeiten sind die freie Formbarkeit, die Medien- und Witterungsbeständigkeit sowie mögliche Transluzenz Argumente, die den Werkstoff für das Bauwesen interessant machen. Sein Materialaufbau aus einzelnen tragenden Fasern in einer Kunststoffmatrix führt einerseits zu richtungsabhängigen Eigenschaften und andererseits zu dünnen und somit leichten schalenartigen Strukturen. Seit etwa einem halben Jahrhundert gibt es Bauprojekte, die auf seine Vorzüge zurückgreifen.

In doppelt gekrümmten Schalenkonstruktionen und Freiformflächen können die meisten positiven Eigenschaften der faserverstärkten Kunststoffe genutzt werden. Durch die einfache freie Formbarkeit im Herstellungsprozess ist er anderen Werkstoffen in diesen Anwendungsfällen überlegen. Demgegenüber gibt es die negativen Randbedingungen, Brandverhalten und Materialpreis, die als Gründe für die seltene Verwendung von FVK für Tragstrukturen anzuführen sind. Das Wissen über die Bemessung von FVK steht den Ingenieuren zur Verfügung. Im Bereich der materialgerechten Verbindungstechnik besteht für das Bauwesen dagegen noch Forschungsbedarf.

Wegen den spezifischen individuell komponierbaren Materialeigenschaften entstehen aus faserverstärktem Kunststoff üblicherweise Fertigteile, die in Werkstätten vorgefertigt werden. Die Produktion einschließlich des Formenbaus, der spätere Transport zur Baustelle und die Montage verlangen gerade bei großen flächigen bzw. räumlichen Strukturen nach einer Auflösung in Einzelteile.

Die Gliederung in Tragwerksteile erfordert Verbindungslösungen, die den Besonderheiten des Materials gerecht werden und für die Baustellenmontage geeignet sind. Materialgerechte Verbindungslösungen dürfen die Faserstruktur des anisotropen Werkstoffes nicht lokal schädigen, sondern müssen fasergerecht flächig im Bauteil oder an der Oberfläche angreifen. Dieser Forderung wird in erster Linie eine Verklebung gerecht. Verklebungen stellen schon deshalb den besten Ansatz für eine Verbindung dar, weil der faserverstärkte Kunststoff selbst durch Verkleben von Fasern bzw. Faserlagen entsteht. Verklebungen sollten vorrangig mit der Bauteilproduktion in der Werkhalle unter optimalen Randbedingungen erfolgen. Sie sind wenig baustellengerecht und ungeeignet für zügige Montageprozesse.

## *1 Einleitung und Zielstellung*

Die Arbeit verfolgt das Ziel, das materialgerechte Verbinden von Stahl und FVK in strukturellen Verklebungen unter den Randbedingungen des Bauwesens über konstruktive Empfehlungen und Bemessungshilfen dem Tragwerksplaner zugänglich zu machen.

Das Verbinden von FVK-Strukturteilen untereinander oder zu Unterkonstruktionen aus unterschiedlichsten Materialien kann über eine Kombination aus Aufkleben von Anschlussteilen und lösbarer mechanischer Fügung im Montageprozess erreicht werden. Die Anschlussteile werden vor allem im Bereich der rostfreien Edelstähle gesehen. Durch die ausreichende Eigensteifigkeit der FVK-Teile genügen lokal begrenzte Anschlussbleche zum Übertragen der auftretenden Kräfte. Mit den Stahlblechen können alle günstigen Eigenschaften des isotropen Werkstoffs Stahl durch eine breite Variation der Anschlusspunktausbildung für die mechanische Fügung genutzt werden. Der Montageprozess auf der Baustelle kann somit auf bekannte und erprobte Verbindungslösungen zurückgreifen.

Übliche Alternativlösungen sind von anderen Baustoffen und Konstruktionsweisen übernommen und gehen nicht auf die Fasertragstruktur des FVK ein. Für Verklebungen von Stahl und FVK im Bauwesen liegen wenig Erfahrungen, Kennwerte und konstruktive Lösungsvorschläge vor. Hierzu soll die Arbeit einen Beitrag leisten.

Es wird eine Auswahl von Strukturklebstoffen in Zugversuchen charakterisiert. In Zugscherversuchen an Couponproben werden Oberflächenvorbereitungen, Klebstoffe und Geometrieinflüsse untersucht. Die Ergebnisse werden mit einer finiten Elementanalyse abgeglichen und anschließend auf eine bauteilnahe Geometrie übertragen, um Untersuchungen an den beeinflussenden Parametern vorzunehmen. Die Ergebnisse münden in konstruktive Empfehlungen und ingenieurmäßige Bemessungsvorschläge.

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Im Bauwesen sind Kunststoffe in großer Vielfalt im Einsatz. Der Fokus der Betrachtung wird auf die hochfesten faserverstärkten duroplastischen Werkstoffe gelegt. Als industrielle Halbzeuge sind Pultrusionsprofile, ebene Platten, Zugbänder und Bewehrungen anzutreffen. Das Augenmerk soll jedoch auf den flächigen, freigeformten, schalenartigen Strukturen liegen, die individuell gefertigt werden. Im Gegensatz zu Zugbändern, Pultrusionsprofilen und Bewehrungsstäben besitzen sie keine vorrangig einachsig ausgerichteten Festigkeitseigenschaften. Vielmehr wird versucht, ausgeglichene Laminatverbunde zu erzeugen, die wechselnden Beanspruchungen, z.B. aus Schnee, Wind, Personenverkehr und Temperatur, robust widerstehen können. Die betrachteten Strukturen bilden Gebäudehüllen, Dächer, Raumabschlüsse, Skulpturen u.ä. Aus dieser Einschränkung lassen sich bevorzugte Kombinationen an Faser-Harzsystemen benennen.

### 2.1 Fasern

Gebräuchliche Fasern sind Glas-, Aramid- und Kohlenstofffasern. Glasfasern sind die preiswerten Standardfasern mit im Allgemeinen ausreichenden Festigkeiten und Steifigkeiten. Aramidfasern sind besonders leicht und zäh. Sie werden vor allem bei zu erwartenden Impactbelastungen und bei Verschleißbeanspruchung verwendet. Kohlenstofffasern sind je nach Typ (HT, HM, UHM) unterschiedlich in ihren hohen Zugfestigkeiten und sehr hohen Steifigkeiten. Die Kohlenstofffasern sind wesentlich leichter, zugfester, dehnsteifer, querschlagempfindlicher und teurer als Glasfasern. Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) läßt sich lokal mit Kohlefaserzulagen in seiner Steifigkeit erhöhen. Reine Kohlenstofffaserverbunde (CFK) sind aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus für die Verwendung in den betrachteten Einsatzbereichen unüblich.

Die Fasern sind in den Lieferformen: Roving, Vlies, Matte, (Komplex- und Abstands-) Gewebe, Gelege und Gewirke verfügbar. Aus Rovings werden ferner geschnittene Kurzfasern und gemahlenes Glas als Füllstoff gefertigt. Zu den Fasern und ihren Eigenschaften sei exemplarisch auf [9, 10, 11, 12, 13] verwiesen.

## 2.2 Harzsysteme

Die wichtigsten zweikomponentigen Harzsysteme, die für die duroplastische Matrix der faserverstärkten Kunststoffe (FVK) verwendet werden, sind ungesättigte Polyester- (UP), Epoxid-, Vinylester- und Acrylatharze. Das Standardharz in Kombination mit Glasfasern ist das ungesättigte Polyester. Epoxidharze sind teurer, aber auch mechanisch hochwertiger. Um im direkten wirtschaftlichen Vergleich zwischen etablierten Baustoffen bestehen zu können, kommt überwiegend der Materialverbund aus Glasfasern und ungesättigtem Polyester (GF-UP) zur Anwendung. Für die unterschiedlichen Anwendungsfälle sind innerhalb jedes Harzsystems breite Variationsmöglichkeiten im Hinblick auf Verarbeitbarkeit, Verarbeitungsverfahren, Topfzeit, mechanische Eigenschaften, Medien- und Alterungsbeständigkeit möglich. Zu den Harzen und ihren Eigenschaften wird stellvertretend auf [9, 11, 14, 12, 13] verwiesen.

## 2.3 Konstruktionsweisen für FVK

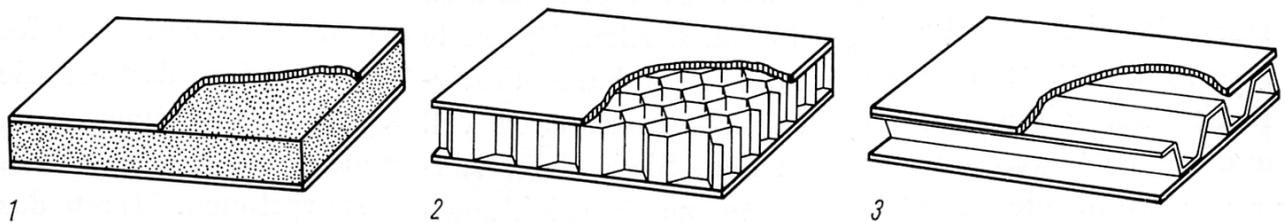
Bei den faserverstärkten Kunststoffen beginnt das Design im Material. Ähnlich wie im Stahlbeton übernehmen zugfeste Fasern bzw. stabförmige Bewehrungen die Zugkräfte im Material. Anders als beim Stahlbeton werden Druckkräfte bei den FVK ebenfalls über die Fasern abgetragen. Die Matrix leistet aufgrund des um Größenordnungen geringeren E-Moduls kaum Anteile am Lastabtrag. Sie stützt die Fasern lokal gegen Stabilitätsversagen. Richtigerweise muss also von Faserkonstruktionen gesprochen werden. Der Kunststoff stellt nur den Klebstoff und die Schutzschicht der Fasern dar. Die mechanischen Eigenschaften des Hybridbaustoffs FVK sind von der Ausrichtung der Fasern in Verbund abhängig. In der Ebene senkrecht zur Faser sind die Eigenschaften schlecht. Deshalb werden die Fasern mit dem Kraftfluss ausgerichtet, aber auch für einen robusten und tragfähigen Verbundwerkstoff konstruktiv in wechselnde Richtungen eingearbeitet.

Unbewehrte Kunststoffteile werden im Bauwesen für Tragwerksteile nicht verwendet. Kunststoffe ohne Faserverstärkung kommen tragend z.B. im Erdbau bei kompakten Behältern und Rohren zur Anwendung. Dafür kommen ausnahmslos thermoplastische Kunststoffe zum Einsatz.

Mit den Fasern werden entweder einachsige Halbzeuge mit ausgeprägten Eigenschaften in einer Richtung gefertigt (z.B. CFK-Lamellen, GFK-Bewehrungsstäbe und Pultrusionsprofile) oder durch Kombination unterschiedlicher Faserausrichtungen flächige Strukturen geschaffen. Materialgerecht werden mit den Fasern nie scharfe Ecken ausgebildet.

Idealerweise werden gerundete Kanten mit Mindestradien ausgeführt. Ein großer Vorteil gegenüber anderen Werkstoffen ist die freie Formbarkeit der nicht ausgehärteten Ausgangsstoffe Fasern und Harz. Je nach der Bindung von Geweben lassen sich die Fasern unterschiedlich leicht auch zu nicht abwickelbaren Flächen drapieren.

FVK werden für die meisten Anwendungen in Formen mit zweidimensionaler Ausdehnung gefertigt. Lokal ist eine Abmessung immer klein gegenüber den beiden anderen Raumrichtungen. Räumliche Strukturen werden durch Krümmen oder das räumliche Zusammensetzen von Flächen geschaffen. Die Fasern können grundsätzlich nur Normalkräfte abtragen und verleihen den flächigen Strukturen hohe Membransteifigkeiten und -festigkeiten. Biegebeanspruchungen werden über Fasernormalkräfte und statische Höhe abgetragen. Zum einen erreicht man diese statische Höhe über die Profilierung der Fläche, zum anderen über eine Splittung der Faserlagen in ein Sandwich mit Druck- und Zugebene. Die erforderliche statische Höhe zwischen beiden Schichten wird mit besonders leichten und schubfesten Materialien hergestellt. Für diese Sandwichkerne gibt es eine Vielzahl von Leichtbaumaterialien (z.B. Schäume oder Wabenplatten). Die Auswahl hängt von den mechanischen Anforderungen an das Sandwich, der Krümmung der Decklagen und dem Herstellungsverfahren des Gesamtverbundes ab. Zusätzlich haben Anforderungen zur Gewichtseinsparung und der Wirtschaftlichkeit Einfluss auf die Wahl der Kernmaterialien. Außerdem kann der Schubverbund zwischen den Decklagen bei größeren statischen Höhen über einfache durchgehende GFK-Stege erreicht werden. Auf diese Weise bleibt der aufgelöste Querschnitt wirtschaftlich, transluzent und leicht [15].



**Abb. 2.1:** Sandwichkernstrukturen, 1. Hartschaumstoff, 2. Wabenkern, 3. Stege bzw. Profile [16]

Grundsätzlich kann der geklebte Verbund zwischen den Fasern auch zur Verstärkung anderer Baustoffe oder Konstruktionen verwendet werden. Anwendungen im Bauwesen existieren für alle klassischen Baumaterialien (Glas, Stahl, Holz, Mauerwerk und Stahlbeton).

Neben der statischen Leistungsfähigkeit der Faserverbundkunststoffe ergeben weitere Eigenschaften Argumente für deren Einsatz. Die Dichtigkeit wird im Behälterbau genutzt.

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Die Medienbeständigkeit ist wichtig in Anwendungen im chemisch aggressiven industriellen Umfeld [17], im Erdeinbau und in der Trinkwasserversorgung. Die geringe Wärmeleitfähigkeit lässt sich vorteilhaft im Fassadenbau im Verbund mit isolierenden Glasscheiben nutzen [18]. Auf die Durchlässigkeit für elektromagnetische Felder wird im Telekommunikationsbereich zurückgegriffen. Im Gerätebau wird die elektrische Isolation von glasfaserverstärkten Kunststoffen geschätzt. In der Architektur und im Design brillieren die Eigenschaften Transparenz, freie Formgebung, Einfärbbarkeit und die Haptik der Oberfläche. Über die Kombination mehrerer dieser Eigenschaften sind die Faserverbundkunststoffe für unterschiedliche Einsatzzwecke anderen Materialien konkurrenzlos überlegen.

Lamine lassen sich in einfachster Weise mit der Netztheorie entwerfen und berechnen [19]. Die Matrixsteifigkeit wird dabei nicht angesetzt und nur die Tragfähigkeit der Fasern berücksichtigt. Entwirft man ein Laminat nach der Netztheorie, erhält man auf direkte Weise eine Aussage zur Langzeittragfähigkeit, ohne Kriechversuche machen zu müssen, da sich durch Kräfteumlagerungen auf die Fasern aus den inneren Kriechvorgängen der Matrix ein Entzug der Matrix am Lastabtrag einstellt [13]. Lamine, die nach der Netztheorie entworfen sind, werden demnach geringere Kriechverformungen aufweisen und sind deshalb anzustreben.

Bei FVK sind die Formmöglichkeiten der Geometrie, die Materialeigenschaften und die Verbindungstechniken direkt abhängig vom Herstellungsverfahren [19]. Die Produktionstechnologie wird anhand von Bauteilgröße und Komplexität und vor allem über die Stückzahl gleicher Teile und den erforderlichen Fasergehalt festgelegt. So erreichen die in Kap. 2.5 genannten Herstellungsverfahren für die unikatigen großformatigen Konstruktionen von Anwendungen mit architektonischem Anspruch technologisch bedingt geringere Fasergehalte und vergleichsweise geringere Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften.

Problematisch für die Kunststoffe ist ihr organischer Ursprung mit Blick auf die Brennbarkeit. Während man die Entflammbarkeit, die Rauchentwicklung und das selbstverlöschende Verhalten durch Zusätze günstig beeinflussen kann, werden mit den genannten Matrixsystemen nie Bauteile mit der Einstufung „nicht brennbar“ entstehen können [12].

Der relativ geringe Elastizitätsmodul von glasfaserverstärkten Kunststoffen und das Kriechverhalten der Matrix erfordern bei Biegekonstruktionen aufgelöste Querschnitte mit vergleichsweise größerer statischer Höhe, um wirtschaftlich mit den üblichen Baustoffen Stahl und Beton konkurrieren zu können.

Bei den Verbindungstechniken besteht noch Entwicklungs- und Forschungsbedarf, um z.B. die Klebtechnik zuverlässig und wirtschaftlich anwendbar unter den Randbedingungen des Bauwesens zu etablieren.

Die Arbeit zielt auf eine bauspezifische Anwendung von GFK, wobei Klebungen auf der Baustelle als nicht praktikabel angesehen werden. Desweiteren wird davon ausgegangen, dass die Bauteile im Werk so groß gefertigt werden, dass die Randbedingungen Herstellbarkeit und Transport ausgeschöpft und Verbindungen beim Ein- bzw. Anbau der Teile auf der Baustelle mechanisch zu schließen sind. Klebeverbindungen sind aus diesem Ansatz heraus nur zwischen dem FVK und Stahlanschlussteilen von Interesse, die die mechanische Fügung ermöglichen (Kap. 3).

### 2.4 Flächige Tragwerke aus FVK

Flächige Tragwerke aus Faserverbundmaterialien sind vorrangig flächenaktive Konstruktionen, die die Beanspruchungen über Membran- bzw. Scheibenkräfte abtragen. Ideal sind reine zugbeanspruchte Membranen, da sie die leistungsfähigste Materialeigenschaft, die Reißlänge, ausnutzen und mit geringem Materialeinsatz große Flächen ohne Stabilitätsprobleme überspannen können. Von hoher Ingenieurskunst zeugt das mit transluzentem GFK aus vorgespannten und zusammengesetzten Hyparschalen von HOSSDORF realisierte „Tulpenblüten“-Dach zur Schweizer Landesausstellung Expo´64 in Lausanne (Abb. 2.2). Die 24 Schirme messen je  $18 \times 18$  m und sind nur 3 mm dünn. Erwähnenswert sind die Klebeverbindungen zu den Randträgern, die einen GFK-Stahl-Verbundquerschnitt ergeben [20].

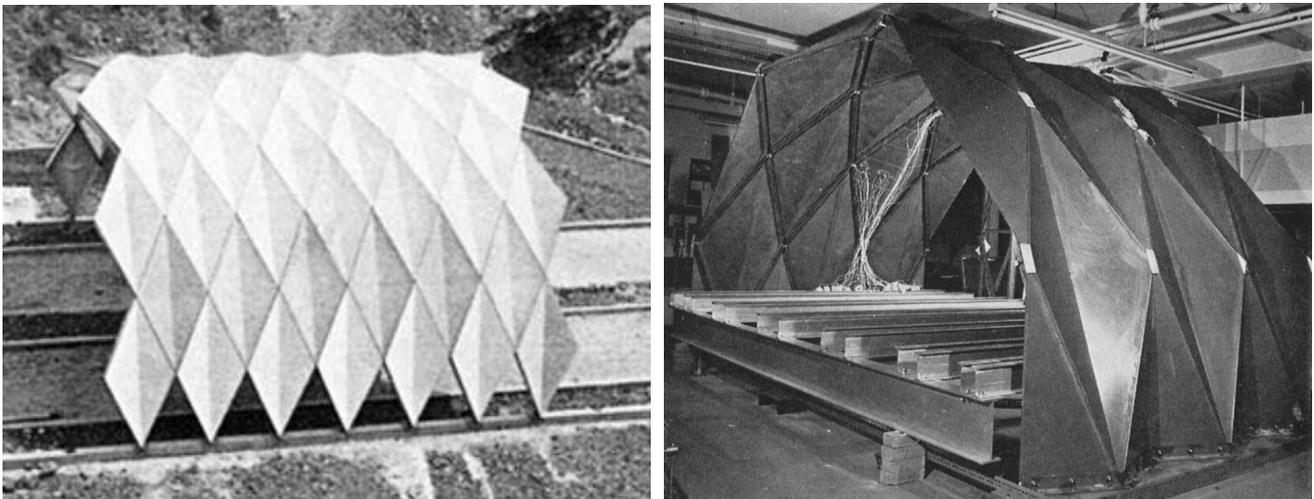


**Abb. 2.2:** links: GFK-Dach „Les Echanges“ mit Schirmen aus zusammengesetzten HP-Schalen zur Expo´64 Lausanne, HOSSDORF [20]; rechts: Fly´s Eye nach FULLER mit  $d=3,66$  m, Sebastopol 2002, Quelle: [www.bfi.org](http://www.bfi.org)

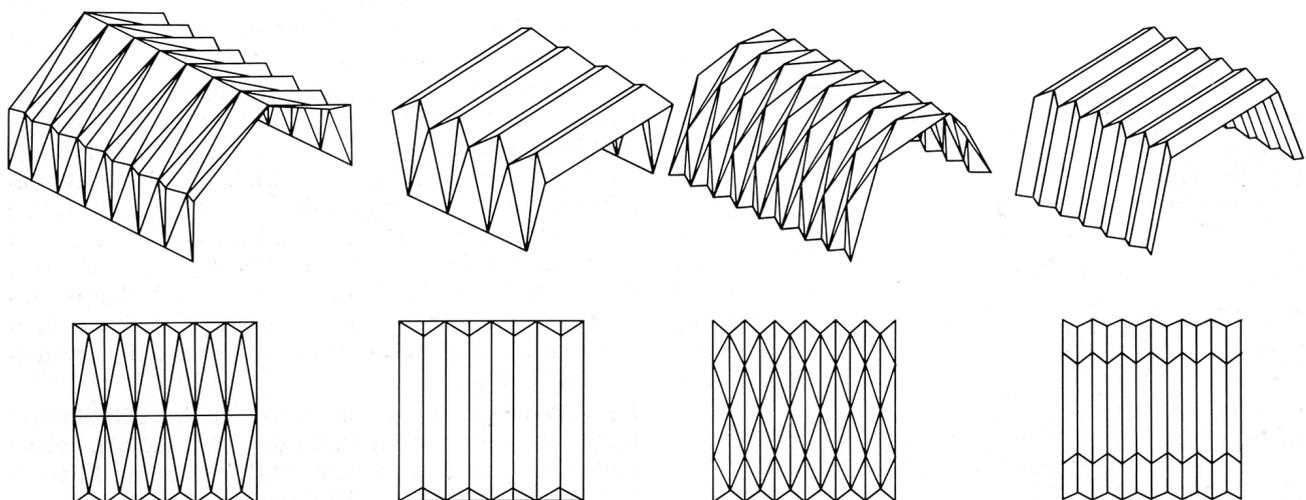
Eine große Zahl der GFK-Tragwerke wurde zudem in Form von Schalen oder Faltenwerken errichtet. Die Faltenwerke erreichen ihre Leistungsfähigkeit über die Tragwirkung des günstigen Scheibenschubes und die Ausnutzung ausreichender Konstruktionshöhen. Über wenige

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

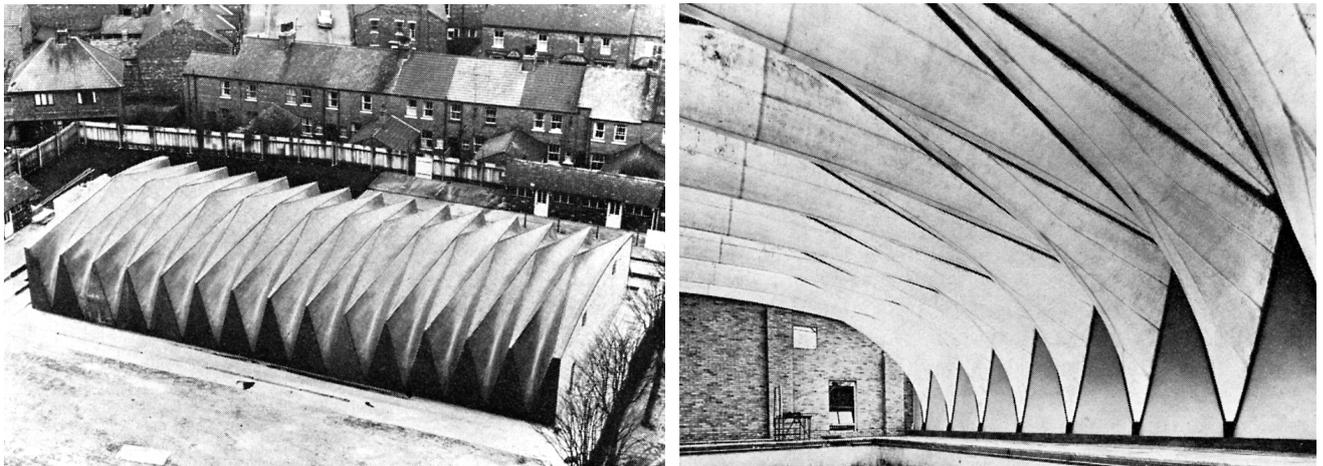
hohe Scheiben bzw. Falten kann gegenüber vielen kurzen Scheiben, bei gleichem Materialeinsatz, die Spannweitengrenze nach oben verschoben werden [16]. Bei den Schalen wurden nach [20] allein für die Radome auf der ganzen Welt etwa 300.000 Konstruktionen errichtet. FULLER ließ sich die gleichmäßige Teilung der geodätischen Kuppel für drei Baugrößen 1965 patentieren. Das in Abb. 2.2 gezeigte Fly's Eye stellt mit 3,66 m die kleinste dar, während die größte 15,24 m erreicht. Für die Radome wurden Baugrößen mit unterschiedlicher Teilung der Kugeloberfläche bis 45 m Durchmesser gebaut, die sehr hohen Wind-, Schnee- und Klimalasten widerstehen [20]. Die weit spannenden Konstruktionen haben unabhängig von der Bauform eine wichtige Gemeinsamkeit. Sie sind herstellungsbedingt in Einzelteile untergliedert und werden anschließend gefügt.



**Abb. 2.3:** links: fahrbares Tonnengewölbe über der Schwefelgewinnungsanlage in Pomezia (b. Rom), R. PIANO 1966; rechts: Faltstruktur von BENJAMIN und MAKOWSKI, Surrey (GB) 1968 [21]



**Abb. 2.4:** Tonnenschalen als Faltwerkstrukturen [21]



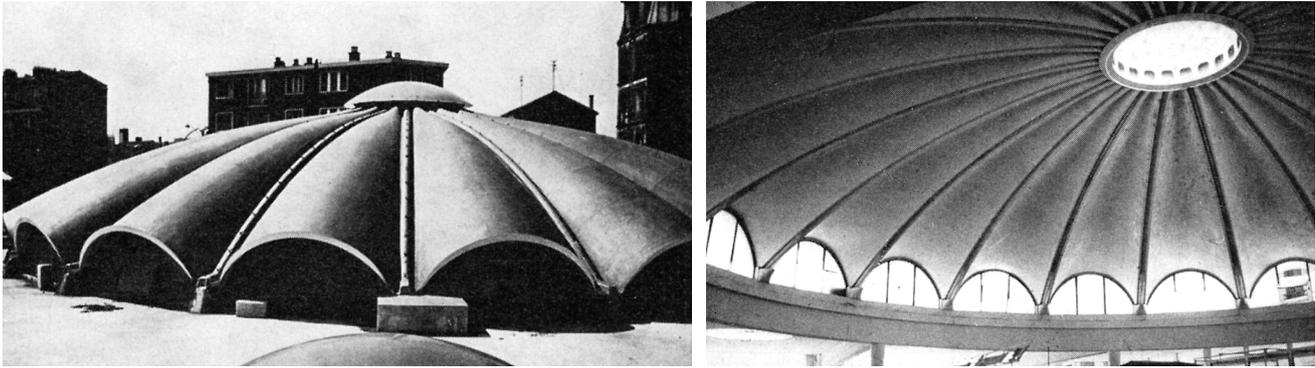
**Abb. 2.5:** transluzente 2,5 mm dünne Tonnenschale mit verschraubten Hyparteilflächen als Schwimmbadüberdachung, Spannweite 15 m, Lincoln (GB) 1968 [21]

Faltwerke lassen sich optimal elementieren, wobei die ebenen Scheiben einfach herzustellen sind (Abb. 2.3, 2.4) [20]. Das Tonnengewölbe über einer Schwefelgewinnungsanlage in Pomezia von RENZO PIANO wurde bereits 1966 über Verkleben von gefalteten rhombischen Einzelteilen hergestellt (Abb. 2.3). Die gebauten Konstruktionen aus faserverstärkten Kunststoffen aus der Pionierzeit des Bauens mit FVK wurden in [20, 22] umfassend zusammengestellt und u.a. nach Tragwerksformen in Kategorien gegliedert. Dabei wird festgestellt, dass die Verbindung zwischen den einzelnen Tragwerksmodulen oft nicht materialgerecht erfolgte.

Nach den Recherchen von GENZEL [20] wurden mit reinen GFK-Faltwerken Spannweiten bis zu 25 m realisiert. Mit GFK-Schalen wurden Spannweiten bis 10 m mit abwickelbaren, 20 m mit synklastischen und 28 m mit antiklastischen Schalen realisiert. Die antiklastischen Schalen erreichen vergleichsweise die größte Beulsteifigkeit und somit den sparsamsten Materialeinsatz. Aus diesem Grund wurden Hyparteilflächen ebenso wie Faltelemente zu größeren Tragstrukturen zusammengesetzt (Abb. 2.5). Aufgrund des typischen E-Moduls und den sehr geringen Wandstärken sind flache und weit spannende Schalenkonstruktionen mit geringen Krümmungen beulgefährdet. Die großen elementierten Schalen werden durch zusätzliche stärkere Krümmung in den Einzelmodulen oder durch Addition von Falt- bzw. Hyparflächen stabilisiert (Abb. 2.3 - 2.6). Bei den Schalen sind Behälter, Schornsteine, Rohre und Silos zu erwähnen, die als Serienprodukte im Industriebau seit Jahrzehnten zuverlässig im Einsatz sind [23, 17].

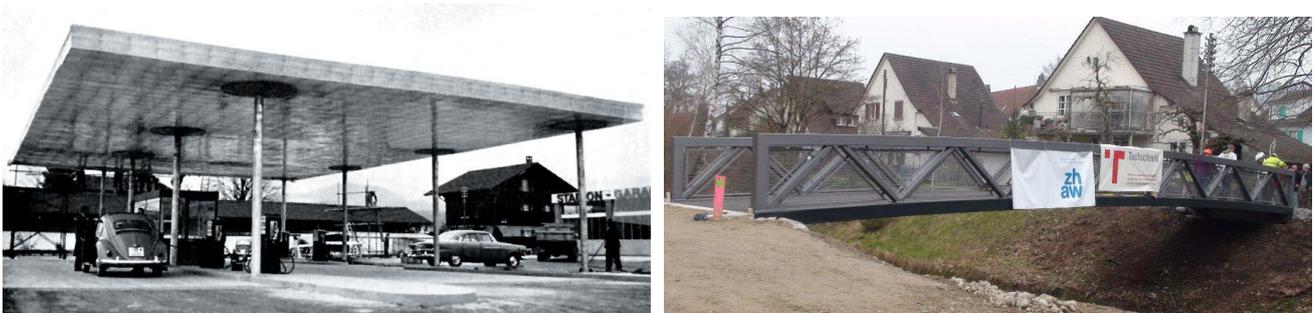
Die Faltwerke und Schalen erfordern große Konstruktionshöhen und haben global keine ebenen Oberflächen. Deshalb kommen trotz der wesentlich ungünstigeren Biegebeanspruchung ebene Platten auch im GFK-Bau zum Einsatz. Die nutzbaren Spannweiten sind für Sand-

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen



**Abb. 2.6:** Dach der Markthalle St. Ouen (b. Paris) aus 20 Kuppelschalen, 7 mm GFK, 18 m Durchmesser, DU CHÂTEAU 1968 [21]

wichkonstruktionen gering. HINTERSDORF gibt in [16] 1,2 m als wirtschaftliche Grenze an, wenn Verformungsrestriktionen und Belastungsanforderungen von Fußböden erfüllt werden müssen. Platten können in Deckschichten und innenliegende Schubträger aufgelöst werden, um wirtschaftlich Spannweiten bis 6 m zu überbrücken. Zum Einen entstehen durch verklebte Pultrusionsprofile Platten, die überwiegend im Brückenbau eingesetzt werden [24, 25]. Zum Anderen entwickeln STURZENEGGER und KURATH ein Stegplattenmodul, das in hoher Qualität wirtschaftlich aus GF-UP mit Vakuuminfusion gefertigt wird, und mit einer Dicke von 20 cm für Wände und Decken Verwendung findet [15]. In einem innovativen Fußgängerbrückenprojekt konnten die Platten in Form eines GFK-Stahl-Verbundes bereits eingesetzt werden. Der Steg über die Eulach in Winterthur ist 18 m lang, 3,5 m breit und mit den 1,2 m hohen verklebten Fachwerkrandträgern für eine Last von 334 kN ausgelegt [26]. ISLER demonstrierte 1960 mit dem  $14,50 \times 20 \times 0,5$  m großen Tankstellendach in Thun die Leistungsfähigkeit von Schubstegplatten (Abb. 2.7). Mit dem gleichen Prinzip wurden von ihm 1975 die großen Scheiben des Faltdachdaches über dem Hof einer Schule in Geisslingen gebaut [20].



**Abb. 2.7:** links: Punktgestütztes Dach aus transluzenter Schubstegplatte, Thun (CH) 1960, [27]; rechts: GFK-Stahl-Verbundbrücke mit GFK-Platte als Zuggurt, Winterthur 2009, [26]

Mit den beliebig formbaren Faserverbundkunststoffen lassen sich neben den klaren geometrischen Grundformen auch völlig frei geformte flächige Tragwerke bauen. Der Lastabtrag erfolgt kombiniert über Biegung und Membrankräfte. Da auch die klassischen Schalenformen durch Randstörungen, ungleichmäßige Belastungen und die zwangsläufige Elementierung keinen idealen Membranspannungszustand erreichen, sind die meisten flächigen Tragwerke mit Verrippungen und Randaufkantungen mit lokaler Biegesteifigkeit versehen. Freie Formen benötigen ausgeprägtere Biegetragglieder bzw. die Spannweiten werden kleiner ausgeführt. Bei diesen Tragwerken stehen gestalterische Absichten im Vordergrund. In vielen Fällen muss der Faserverbundkunststoff nicht gegen andere Werkstoffe wirtschaftlich konkurrieren. Er ist das einzige Material, mit dem sich die Form, die Tragfähigkeit und die zusätzlichen Anforderungen, z.B. Medienbeständigkeit und Transluzenz überhaupt realisieren lassen. Ein Beispiel für eine solche Struktur ist der 12 m hohe D-Tower in Doetinchem (NL) (Abb. 2.8). Die aus 19 Modulen gefügte Plastik wurde über die aussteifenden Randaufkantungen der Module verschraubt. In den Flächen ist das Laminat 4 mm dick.

Die Buckelschalen von ISLER sind experimentell gefundene Formen, die auch als frei geformt angesehen werden können, aber ideale Membrankraftzustände aufweisen und entsprechend unverrippt und mit geringen Wandstärken ausgeführt sind (Abb. 2.8).



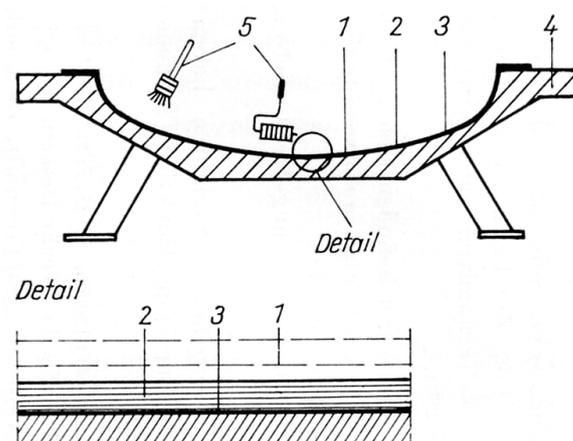
**Abb. 2.8:** links: D-Tower von NOX ARCHITECTS, BOLLINGER / GROHMANN, Doetinchem (NL) 2004, Quelle: [www.deskproto.com](http://www.deskproto.com); rechts: dünne Buckelschale von ISLER (CH) 1985, [20]

## 2.5 Herstellungsverfahren für große Bauteile aus FVK

Großformatige Faserverbundbauteile mit geringen Stückzahlen bis hin zu Unikaten sind ausschließlich über die handwerklichen Herstellungsverfahren wirtschaftlich zu produzieren. Die Herstellung erfolgt gegen eine einseitige Negativform über den lagenweisen Schichtaufbau zumeist mit den flächigen Fasergebilden Gewebe, Gelege und Fasermatten. Einachsige Zulagen werden über Rovingbänder eingebracht.

Je nach Oberflächenqualität der Schalung und den Anforderungen an das Bauteil können durchgefärbte oder transparente Gelcoatschichten in die Negativform in Kombination mit feinen Oberflächenvliesen bzw. Mattenlagen eingebracht oder die Bauteile nach dem Ausschalen an der Oberfläche nachbearbeitet und lackiert werden.

Der lagenweise Aufbau erfolgt im Handlaminat durch Tränkung und Entlüftung jeder Faserlage (Abb. 2.9). Ein allmählicher Schichtaufbau schützt vor Überhitzung dicker Lamine durch die exotherme Härtingsreaktion. Allerdings ist der manuelle Arbeitsaufwand für diese Produktionsform am höchsten. Dafür können die Kosten beim Formenbau erheblich unter denen für Serienfertigungen liegen. Bei Unikaten wird u.U. eine Zerstörung der Form beim Entschalen eingeplant. Einen Überblick zu den Herstellungsverfahren, vor allem zu den jeweiligen geometrischen Restriktionen, Schalungskosten und Lamineigenschaften, gibt EHRENSTEIN in [28].



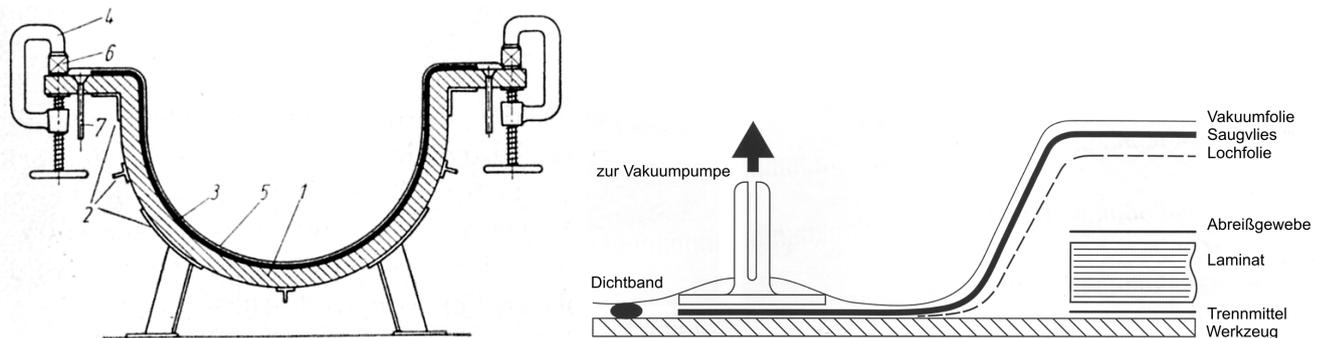
**Abb. 2.9:** Handlaminieren mit 1. Erzeugnis, 2. Gelcoat, 3. Trennmittel, 4. Negativform, 5. Laminierwerkzeug [16]

Üblich für doppelt gekrümmte Geometrien bzw. freie Formen sind CNC-gefräste Negativschalungen aus PUR-Hartschaum. Ohne einen wesentlichen Mehraufwand beim Formenbau lässt sich die Qualität (Lufteinschlüsse, Fasergehalt) des Faserverbundbauteils verbessern, wenn

## 2.5 Herstellungsverfahren für große Bauteile aus FVK

das Laminat innerhalb der Topfzeit des Harzes mittels Vakuumsack, also über die Nutzung des atmosphärischen Luftdrucks, angedrückt wird und aushärtet.

Zur Abführung von überschüssigen Harzanteilen sind für den Vakuumprozess zusätzliche Funktionsschichten nötig (Abb. 2.10). Die begrenzten Topfzeiten üblicher Laminierharze können in Kombination mit großen Geometrien zu zeitlichen Problemen in der Umsetzung der Nasspressung mit der rechtzeitigen Vakuumaufbringung führen.



**Abb. 2.10:** links: Vakuumsackverfahren mit 1. und 2. verstärkte Form, 3. Erzeugnis, 4. Spannvorrichtung, 5. Vakuumsack, 6. Dichtungsrahmen, 7. Vakuumleitung [29]; rechts: Funktionsschichten beim Vakuumsackverfahren [30]

Ohne die Zeitbegrenzung kann mit einem trockenen Aufbau der Laminatschichten gearbeitet werden und nach Anlegen eines Vakuums ein besonders niedrig viskoses Harz in die Faserlagen eingesaugt werden. Für diese Vakuum-Infusion wird bei den Funktionsschichten statt der Lochfolie und dem Saugvlies eine Fließhilfe eingelegt, die die Harzverteilung unterstützt und eine Tränkung der Faserlagen senkrecht zur Fließrichtung ermöglicht. Fließhilfe und Abreißgewebe werden nach dem Aushärten entfernt [30].

Große konvexe Geometrien wie z.B. Behälter und Röhren können im Wickelverfahren über einem Kern mit hoher Qualität durch das maschinell gesteuerte Aufwickeln von getränkten Rovingsträngen oder Faserbändern produziert werden.

Die Herstellungsverfahren sind seit Jahrzehnten bewährt und haben in Kleinstserien bzw. für Unikatbauten nach wie vor keine Alternativen. Die Herausforderung bei anspruchsvollen Bauteilgeometrien der Architektur sind die Logistik und die Sicherung der Maßhaltigkeit für eine hohe Anzahl unterschiedlicher Einzelteile, die zu einem großen Ganzen zu fügen sind (z.B. Kap. 3.4.2). Hierbei hilft die CNC-Fertigung der Laminierformen aus PUR-Hartschäumen, die eine wichtige Nahtstelle zwischen modernen Planungswerkzeugen und den klassischen Herstellungsverfahren darstellt.

## 2.6 Fugen von montierten Faserverbundkonstruktionen

Das Fügen setzt zunächst eine Fuge zwischen Bauteilen und Materialien voraus. Fugen begegnet man im Bauwesen u.a. als Arbeits-, Bewegungs-, Anschluss-, Lager-, Dämm-, Montage-, Schallschutz-, Gründungsfugen und vor allem als Konstruktionsfugen. Gründe für die Anordnung einer Fuge sind z.B. Montageprozesse, Bauabläufe und Bauabschnitte, Materialwechsel, Bauteilanschlüsse, maximale Transportabmaße, Recycling, Bauteilschwinden, Sollrissstellen, Lagerung von Bauteilen oder ungleichmäßige Baugrundsetzungen. Daraus ergeben sich als wichtige Aufgaben der Fugen die Kraftübertragung, das Zulassen von Bewegungen, das Verbinden von Bauteilen, das Dichten und das Isolieren gegen Schall oder Wärmeübergang.

Für die Kraftübertragung in Fugen wurden verschiedene Theorien erarbeitet. Die Rauheit einer Fuge wird z.B. als tragende Verzahnungen betrachtet. Über die Tragwirkung der im Kontakt stehenden Zähne und die möglichen Versagensmodi lassen sich konstruktive Auslegungen von kraftübertragenden Fugen vornehmen. Zur Modellierung und Theorie der kraftübertragenden Fugen wird auf RUTH in [31] verwiesen.

Die kraftübertragenden Fügungen können mit verschiedenen Verbindungen hergestellt werden. Eine Einteilung in drei Kategorien von Verbindungstypen ergibt eine grobe Gliederung, wobei Kombinationen möglich und üblich sind:

- kraftschlüssig:
- Tragwirkung durch Fugennormalkraft und aktivierte Reibung
  - meist lösbar
  - z.B. Nageln, Schrauben, einfache Lagerfugen, Klemmen, Spannen ...
- formschlüssig:
- Tragwirkung durch Ineinandergreifen der Fügepartner
  - lösbar und nicht lösbar
  - z.B. Schrauben, Schnappen, Nieten, Clinchen, Verzahnen, Verstiften, Verbolzen, Klettverschluss ...
- stoffschlüssig:
- Tragwirkung durch molekulare oder atomare Kräfte
  - nicht lösbar
  - z.B. Löten, Schweißen, Kleben ...

Die Fügung erfordert eine Verbindung, die durch den Herstellungsprozess und den Transport der Bauteile, dem Arbeitsgang der Montage, der anschließenden Nutzung und dem

Arbeitsgang der Demontage maßgeblich in der Auslegung beeinflusst wird.

Für leichte Faserverbundkonstruktionen kann eine temporäre Nutzung und der mobile Charakter eines leichten Gebäudes zum Tragen kommen. Ein wiederholter Montage- und Demontageprozess beeinflusst die Wahl der Verbindung maßgeblich.

Mit Blick auf die Demontagefreundlichkeit einer Verbindung werden nach EHRENSTEIN [32] folgende Regeln zusammengetragen:

- Anzahl der Verbindungselemente minimieren
- Anzahl der Verbindungsarten minimieren, um Werkzeugwechsel bei der Demontage zu vermeiden
- Lösbarkeit der Verbindungselemente mit Standardwerkzeugen vorsehen
- schnelle Erkennbarkeit und gute Zugänglichkeit der Verbindungselemente gewährleisten
- einheitliche Löserichtungen der Verbindungselemente vorsehen
- Verbindungselemente sollten ohne Gegenhalt gelöst werden können
- Verbindungen zwischen Bauteilen, deren Werkstoffe sich im stofflichen Recycling nicht miteinander vertragen, sind lösbar zu gestalten.
- Materialverträglichkeit (bzw. Trennbarkeit) der Befestigungselemente und Baugruppen vorsehen
- Reduzierung der Werkstoffvielfalt

### 2.7 Bolzen-, Niet- und Durchsteckverbindungen

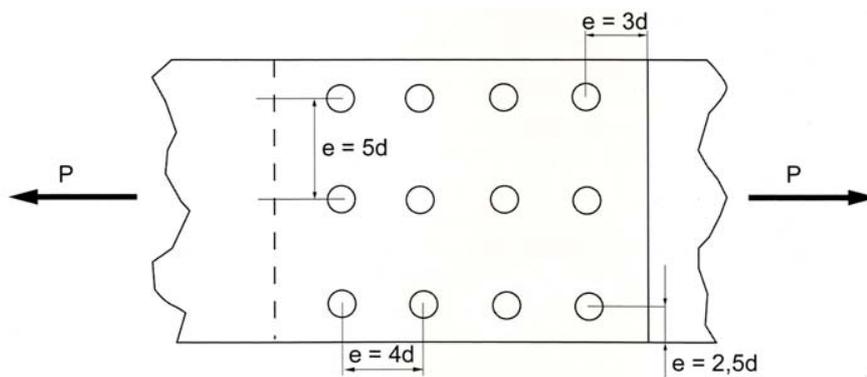
Für Fahrzeuge oder Luftfahrtgeräte aus FVK werden stabförmige Verbindungsmittel bewusst gewählt, weil im Servicefall einzelne Strukturteile getauscht werden können. Die Schraub- oder Nietverbindungen werden wegen der Lösbarkeit, der Einfachheit, der Wirtschaftlichkeit gern verwendet. Nieten sind nicht zerstörungsfrei lösbar. Durch ein Aufbohren eines Nietes kann zumindest das Bauteil unbeschädigt gelöst werden und über dasselbe Loch eine neue Verbindung erfolgen.

Den stabförmigen Verbindungsmitteln muss in Kombination mit den Faserkonstruktionen zur Last gelegt werden, dass sie durch das Einbringen des Bohrloches eine lokale Zerstörung der

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

tragenden Fasern erfordern. Dieser Schädigung wird mit verschiedenen Maßnahmen entgegengewirkt. Entweder wird im Verbindungsbereich das Laminat intern über Zulagen verstärkt oder es kommen aufgesetzte FVK-Lochverstärkungen zum Einsatz. Diese Lochverstärkungen bestehen nicht aus hochmoduligen Fasern, da sonst die Kerbfaktoren besonders stark ansteigen. Unverstärkt lassen die Bolzenverbindungen nur eine geringe Ausnutzung des Zugkraftpotentials des anschließenden Laminates zu. Alternativ kann laststeigernd im Laminierprozess die Faserbewehrung um einen Schalungsdorn herumgelegt werden, sodass für die Bolzenverbindung keine Fasern durchtrennt werden (Abb. 2.13). Die Anforderungen an die Präzision der Schalung bzw. das Schrumpfverhalten des Harzes sind entsprechend hoch.

Die FVK-Werkstoffe verhalten sich annähernd elastisch bis zum Bruch. Ein Fließen zum Abbau lokaler Spannungen existiert nicht. Die Bohrlöcher reagieren entsprechend empfindlich mit örtlicher Zerstörung und Delamination auf die Lochlaibungsbeanspruchungen von metallischen Bolzen. Deshalb kommen bei hoch beanspruchten Bolzenverbindungen eingeklebte Hülsen im Bohrloch zur Anwendung. Werden diese metallischen Hülsen mit einem breiten Kragen eingeklebt, werden Anteile der Lochlaibungskraft über die Klebung des Kragens flächig und faserparallel in das Laminat eingetragen [33]. Die Bruchkraft lässt sich dadurch steigern. Das Materialverhalten des FVK führt dazu, dass nur wenige Bolzenreihen hintereinander tragend angesetzt werden können. Üblich ist der Ansatz von zwei Reihen. Mit mehrreihigen Bolzenverbindungen kann die Tragfähigkeit gegenüber einer Einzelreihe nur geringfügig gesteigert werden [19].



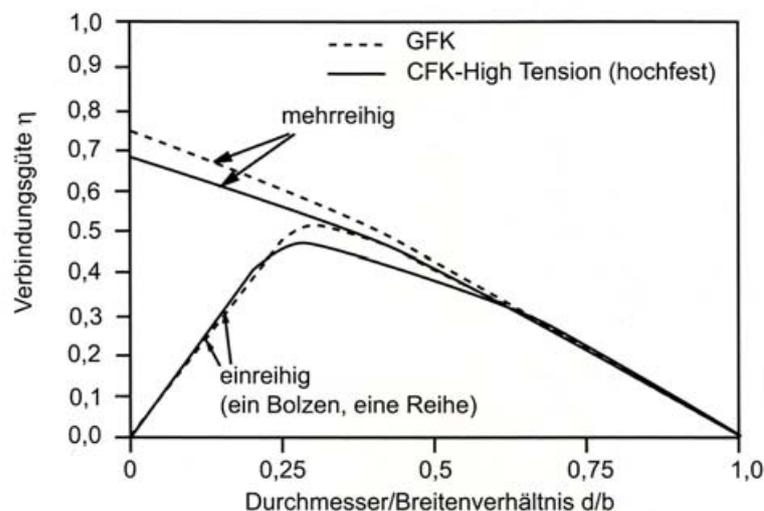
**Abb. 2.11:** Konstruktive Abstände für mehrreihige Bolzen-, Niet- und Durchsteckverbindungen [32]

Bolzenverbindungen müssen seitlich geführt werden, d.h. es sind große Unterlegscheiben vorzusehen. Werden für die punktuellen Verbindungen kleine Verbindungsmittelabmessungen mit geringen Abständen gewählt, wirken sie für die anschließende Struktur nahezu kontinuierlich. Zulässige Randabstände sind mit mindestens  $e = 3 \cdot d$  vorzusehen (Abb. 2.11). Bauteile mit konstanter Dicke und Bolzenverbindungen werden anhand

der Tragfähigkeit der bohrlochbelasteten Ränder bemessen, wobei in den Flächen eine Überdimensionierung in Kauf genommen wird.

Bei der Verwendung von CFK ist auf eine Unterbindung von Kontaktkorrosion zu achten. Die Schrauben müssen geeignet passiviert und die Lochlaibung geschützt werden [32].

Wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Bolzenverbindung hat die Verbindungsart. Einschnittige Ausführungen erhalten gegenüber der symmetrischen zweischnittigen Variante eine zusätzliche Belastung durch ein Biegemoment infolge Exzentrizität und sind demzufolge weniger belastbar. Eine Verbesserung kann bei beiden Ausführungen durch die Aufbringung von Anpressdruck durch die Verwendung von großen Unterlegscheiben und eine aufgebrachte Vorspannung erreicht werden. Allerdings muss bei der Auslegung die Relaxation in Dickenrichtung des Laminates berücksichtigt werden [32]. Für Nietverbindungen existieren verschiedene z.T. patentrechtlich geschützte Entwicklungen. Während des Nietvorgangs wird dauerhafter Anpressdruck auf die Verbindung erzeugt. Ein Nachspannen, wie bei Schraubenverbindungen, ist nicht möglich. Blindniete können allein von einer Seite in die Fügepartner gesetzt werden.



**Abb. 2.12:** Auslegungsdiagramm für Bolzen-, Niet- und Durchsteckverbindungen [32]

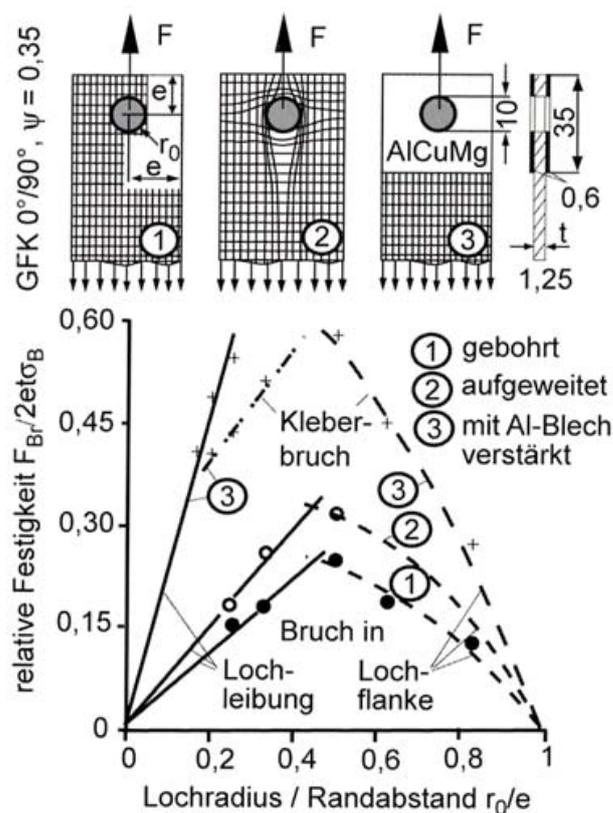
Eine günstige Gestaltung einer stabförmigen Verbindung erreicht man über ein Verhältnis des Bolzendurchmessers  $d$  zur tragenden Breite  $b$  der Verbindung von 0,3 bei einer einreihigen Verbindung von CFK (Abb. 2.12). Übersteigt das Verhältnis den Wert von 0,3, lässt sich die Verbindungsgüte, d.h. die Festigkeit einer Verbindung im Verhältnis zur Grundfestigkeit des Werkstoffes der Füge Teile, nur geringfügig steigern [32].

Für die Ausführung von mehreihigen Bolzenverbindungen sind in Abb. 2.11 die Mindest-

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

lochabstände zusammengefasst. Grundsätzlich sind die angegebenen Abstände abhängig vom Laminataufbau. Empfohlen wird ein quasi-isotropes Laminat bzw. ein Laminataufbau mit maximal 37,5% und minimal 12,5% Faseranteil in einer Richtung. Wird dieser empfohlene Bereich verlassen, kommt es nicht zum Lochlaibungsversagen, sondern zu kombiniertem Ab- und Ausreißen mit geringeren Festigkeiten. Je mehr Schichten gleicher Ausrichtung übereinander zusammengefasst werden, desto kleiner ist die Festigkeit. Der Lagenaufbau, also die wechselnde Schichtabfolge der Faserlagen, bestimmt maßgeblich über die Lochlaibungsfestigkeiten.

Die Tragfähigkeit der Bolzenverbindung lässt sich wesentlich steigern durch Faserumlenkung um den Bolzen anstatt zu bohren und durch Aufbringen einer Pflasterverstärkung in Form eines Metallblechs [34] oder FVK-Tapes (Abb. 2.13). Beide Maßnahmen sind kombinierbar. Das Versagen der blechverstärkten Variante erfolgt immer durch Klebstoffbruch [32]. Die ausgewerteten Versuche lassen erkennen, welches Kraftanschlusspotential in aufgeklebten Stahlblechen steckt, wenn die Lasteinleitung in die steifen verklebten Bleche mit geringer bzw. ohne Exzentrizität erfolgt.



**Abb. 2.13:** Einfluss einer Faserumlenkung und Blechverstärkung auf die Lochlaibungsfestigkeit [32]

$$\begin{array}{lll}
 r_0 = \text{Lochradius} & \sigma_B = \text{Bruchspannung ohne Loch} & t = \text{Probendicke} \\
 F = \text{Kraft} & \psi = \text{Fasergewichtsanteil} & e = \text{Randabstand}
 \end{array}$$

Typische Versagensarten von stabförmigen Verbindungen sind das Lochlaibungsversagen, das bei ca. 0,4% Stauchung eintritt. Das sprödharte Verhalten ohne plastische Verformungen zum Abbau von Spannungsspitzen in der Lochwandung führt zu einer schädigenden Delamination am Bohrloch. Mit dem Schubversagen, dem sog. Pushout, erreichen randnahe Bohrlöcher in Pultrusionsprofilen die Tragfähigkeitsgrenze. Bei engen Bohrlochabständen ist ein Bruch im Restquerschnitt üblich. Einen Überblick zu den Versagensformen von Bolzenverbindungen gibt Abb. 2.14.

Versagensart		Dimensionierung
	Lochleibung	$\sigma_{cx} \leq F / (d \cdot t)$
	Abreißen	$\sigma_{2x} \leq F / [(b - d)t]$
	Ausreißen	$\sigma_{xy} \leq F / (2 \cdot e \cdot t)$
	Spalten	$\sigma_{2y} \leq F / [(e - d/2)t]$
	kombiniertes Ab- und Ausreißen	$\sigma_{2x}(b - d) + \sigma_{xy}e \leq 2F / t$
	Nietabscheren	$\tau_{Niet} \leq 4F / (\pi \cdot d^2)$

**Abb. 2.14:** Versagensbilder und Schätzformeln zur Vordimensionierung von Bolzen-, Niet- bzw. Durchsteckverbindungen [32]

$F$  = Kraft

$\sigma$  = Festigkeit

$d$  = Lochdurchmesser

$t$  = Probedicke

$b$  = Probenbreite

$e$  = Endkantenabstand

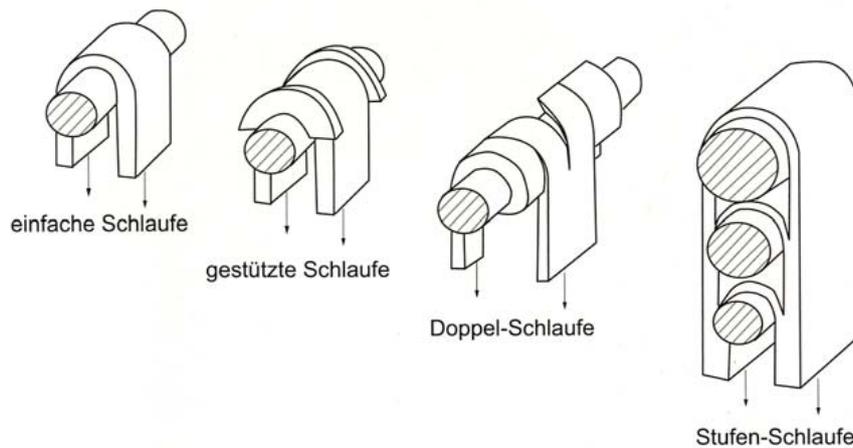
$z$  = Zug

$x, y$  = Richtung

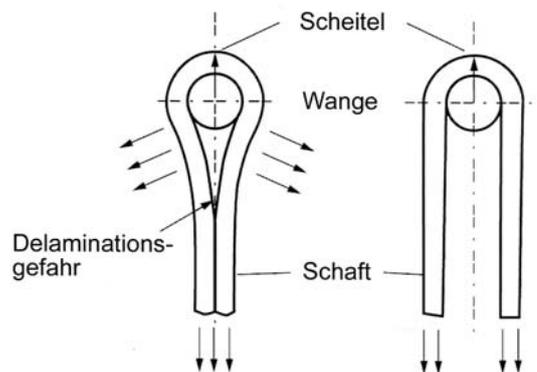
Index:  $c$  = Druck

## 2.8 Bänderschlaufen

Der Lasteintrag über Bänderschlaufen ist eine fasergerechte Verbindungslösung, die sich für den punktuellen Eintrag hoher Lasten bei beengten Platzverhältnissen eignet [13]. Ein Faserstrang umschlingt formschlüssig einen Bolzen und überträgt die Kraft direkt. Selbst bei Matrixschädigung durch Überbelastung bleibt eine Resttragfähigkeit erhalten. Besonders leistungsfähig ist eine seitlich gestützte Ausführung (Abb.2.15), bei der ein räumlicher Spannungszustand erzeugt wird. Eine umfassende Arbeit zu Bänderschlaufen wurde von KNAUER [35] erstellt. Ein bekanntes Anwendungsgebiet von hochtragfähigen Schlaufen stellen Rotorblattaufhängungen, z.B. von Helikoptern, dar. Augenschlaufen besitzen gegenüber Parallelschlaufen eine verminderte Tragfähigkeit, weil sie zusätzlich mit ungünstigen Radialspannungen am Übergang zum Schaft beansprucht werden, die eine Delamination bewirken können (Abb. 2.16).

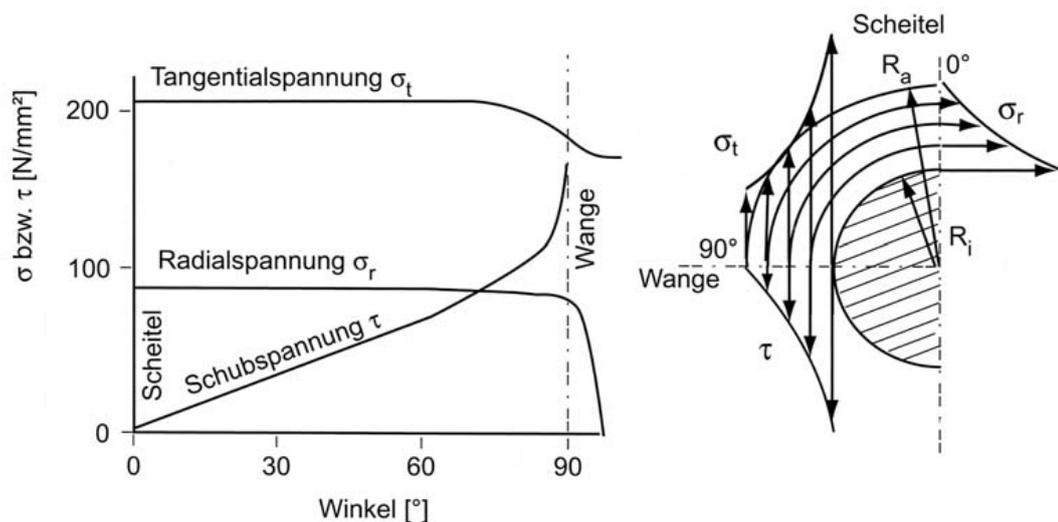


**Abb. 2.15:** Prinzipielle Konstruktionsbeispiele für Schlaufenverbindungen [32]



**Abb. 2.16:** Augen- und Parallelschlaufe [32]

Die Schlaufe ist durch einen Spannungszustand beansprucht, der in Umfangsrichtung (tangential) und vor allem über die Schlaufendicke (radial) einen nichtlinearen Spannungsverlauf ergibt. Die Tangentialspannung  $\sigma_t$  parallel zu den Fasern ist annähernd konstant. In radialer Richtung steigt die Tangentialspannung zum Innenrand hin an. Geometriebedingt sind die inneren Fasern kürzer als die äußeren Faserlagen. Sie sind somit steifer und tragen einen höheren Lastanteil. Bei sehr kleinen  $E_I/E_{II}$ -Verhältnissen wandern die äußeren Fasern durch Verformung nach innen und entziehen sich zusätzlich der Lastaufnahme. Es entsteht eine Druckspannung  $\sigma_r$  in radialer Richtung, die am Außenrand gleich Null ist und nach innen zunimmt (Abb. 2.17). Wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit hat das Radienverhältnis  $R_a/R_i$ . Mit steigendem Verhältnis, also kleineren Bolzen bei dicker werdender Schlaufenwulst, nimmt die Belastungsspitze am Innenrand zu. Es wird deshalb empfohlen mit geringer Biegesteifigkeit zu arbeiten und den Schlaufenwulst möglichst dünnwandig zu gestalten [32, 13].



**Abb. 2.17:** Spannungsverläufe einer UD-Schlaufe mit  $R_a/R_i=1,56$ ; links: entlang des Bolzens bei  $R_i$ ; rechts: radial über die Schlaufendicke [32]

Durch zunehmende Verformungsunterschiede zwischen Innen- und Außenseite erreicht die Schubspannung in tangentialer Richtung am Auslauf ein Maximum. Sollte eine Gleitung auf der Wange durch Reibung behindert sein, bildet sich in radialer Richtung zusätzlich eine Spannungsspitze am Innenrand aus.

Eine traglaststeigernde seitliche Stützung der Schlaufe, s. Abb. 2.15 Mitte, erzeugt in Bolzenrichtung eine zusätzliche konstante Druckspannung, die nicht durch entlastende Risse abgebaut werden kann [19]. Außerdem verhindert die seitliche Stützung ein Sekundärversagen durch Abgleiten der Stranglagen [32]. Während ungestützte Schlaufen im Scheitel durch

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Zwischenfaserbruch lokal versagen, erreicht eine gestützte Schlaufe ihre Traggrenze durch Faserbruch im Strang [19]. Die Schlaufe soll eng auf dem Bolzen sitzen und nicht größer sein, da sonst mit einer Ovalisierung und Schubrisen zu rechnen ist [13].

Das Verhältnis aus mittlerer Spannung im Strang zur größten Tangentialspannung wird als Anschlussgütegrad  $\eta \leq 1$  bezeichnet. Reduziert wird dieser Wert durch einen hohen Faser-E-Modul und ein zunehmendes Radienverhältnis  $R_a/R_i$ . Je dicker der Schlaufenstrang ist, desto höher ist die Spannungsspitze.

Eine Reduzierung dieser Spitzen erreicht man über eine möglichst breite Ausbildung der Schlaufe und damit eine Verringerung der Wandstärke. Ein empfohlenes Radienverhältnis liegt für GFK-Strangschlaufen zwischen 1,7 - 1,8. Wegen der geringeren Querdruckempfindlichkeit erreichen gestützte Schlaufen aus GFK höhere Versagensspannungen als solche aus CFK. Kombinationen mit innenliegenden Glasfasern und außenliegenden Kohlefasern als Hybridschlaufe sind günstig [13].

Nach [19] lassen sich gestützte Schlaufen analog zu einem dickwandigen Rohr unter Innendruck berechnen. Zunächst werden die zwei Geometriefaktoren  $a$  und  $c$  benötigt, die sich aus den beiden Radien berechnen lassen:

$$a = \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left[ 1 + \frac{r_a^2}{r_i^2} \right] \quad (2.1)$$

$$c = \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left[ 1 - \frac{r_a^2}{r_i^2} \right]. \quad (2.2)$$

Mit den Querdehnzahlen in allen Raumrichtungen lässt sich die zulässige Kraft  $F$  bzw. die erforderliche Schlaufenbreite  $b$  berechnen

$$F = \frac{\varepsilon_{\parallel z} \cdot 2 \cdot r_i \cdot b \cdot E_{\parallel}}{a(1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}) - c \cdot \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} \cdot (\nu_{12} - \nu_{31} \cdot \nu_{23})} \quad (2.3)$$

$$b = \frac{F}{2 \cdot r_i \cdot \varepsilon_{\parallel z}} \left[ \frac{a}{E_{\parallel}} \cdot (1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}) - \frac{c}{E_{\perp}} \cdot (\nu_{12} - \nu_{31} \cdot \nu_{23}) \right]. \quad (2.4)$$

SCHÜRMANN gibt in [13] geschlossene Lösungen der Differentialgleichung für die Radial- und die bemessungsrelevante Tangentialspannung an. Für gestützte Schlaufen kann aus beiden Größen die Spannung in axialer Richtung berechnet werden.

## 2.9 Verkleben faserverstärkter Kunststoffe

Auf das Thema Kleben soll nachfolgend ausführlicher eingegangen werden, weil es eine komplexe und fasergerechte [36] Füge­technologie mit hohem Zukunftspotential ist. Die Abb. 2.18 veranschaulicht die umfangreichen Einflüsse auf das Kleben, die z.T. nichtlinear voneinander abhängen. Beim Kleben werden zwei Füge­teilflächen mit einem Klebstoff verbunden. Eine Schlüsselstellung nehmen dabei die beiden Grenzschichten jeweils zwischen Klebstoff und Füge­teil ein. Auf die Wechselwirkungen in den Grenzschichten geht Kap. 2.9.3 ein. Als wertvolle Quelle zum Kleben sei besonders auf das Buch von HABENICHT [14] verwiesen.

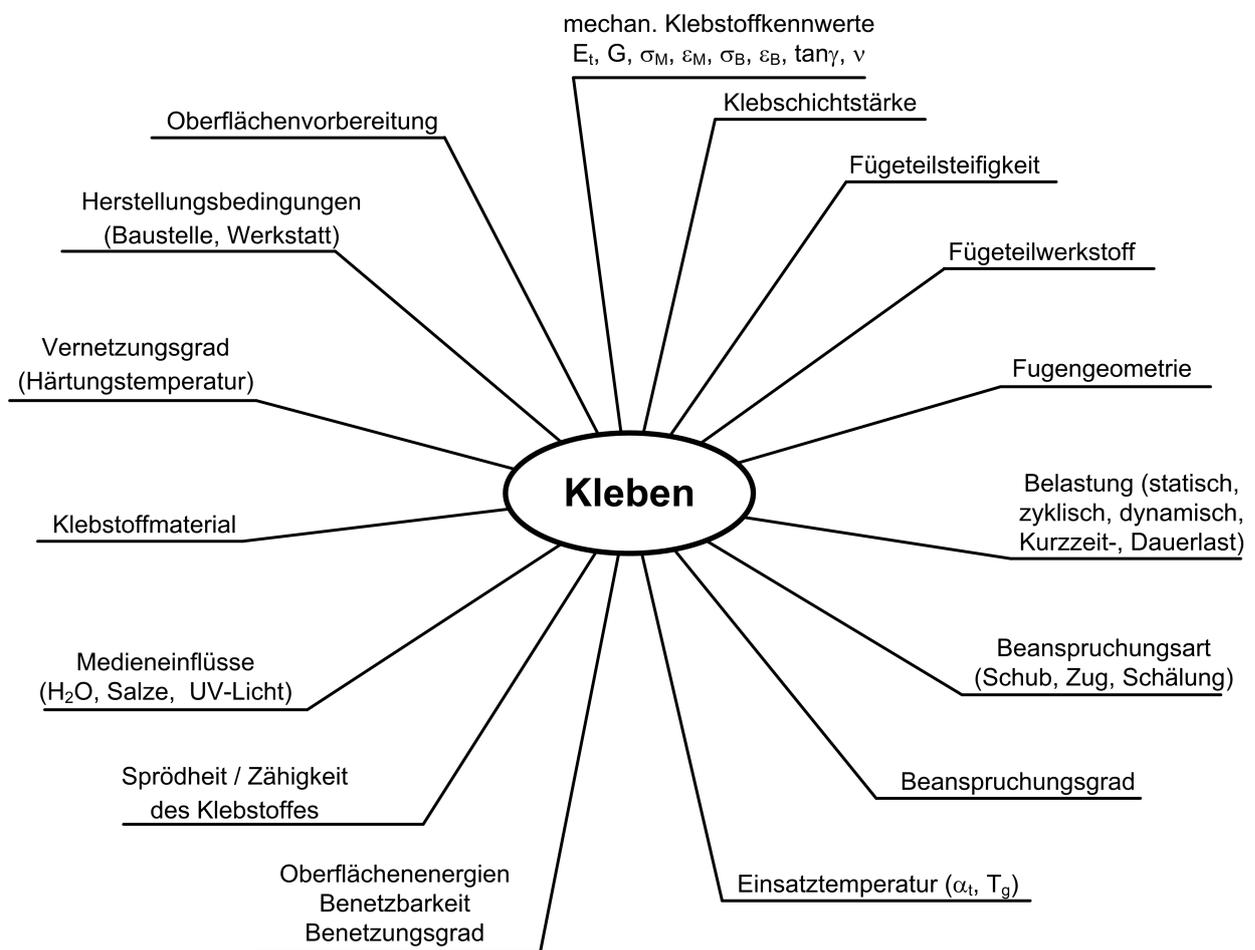
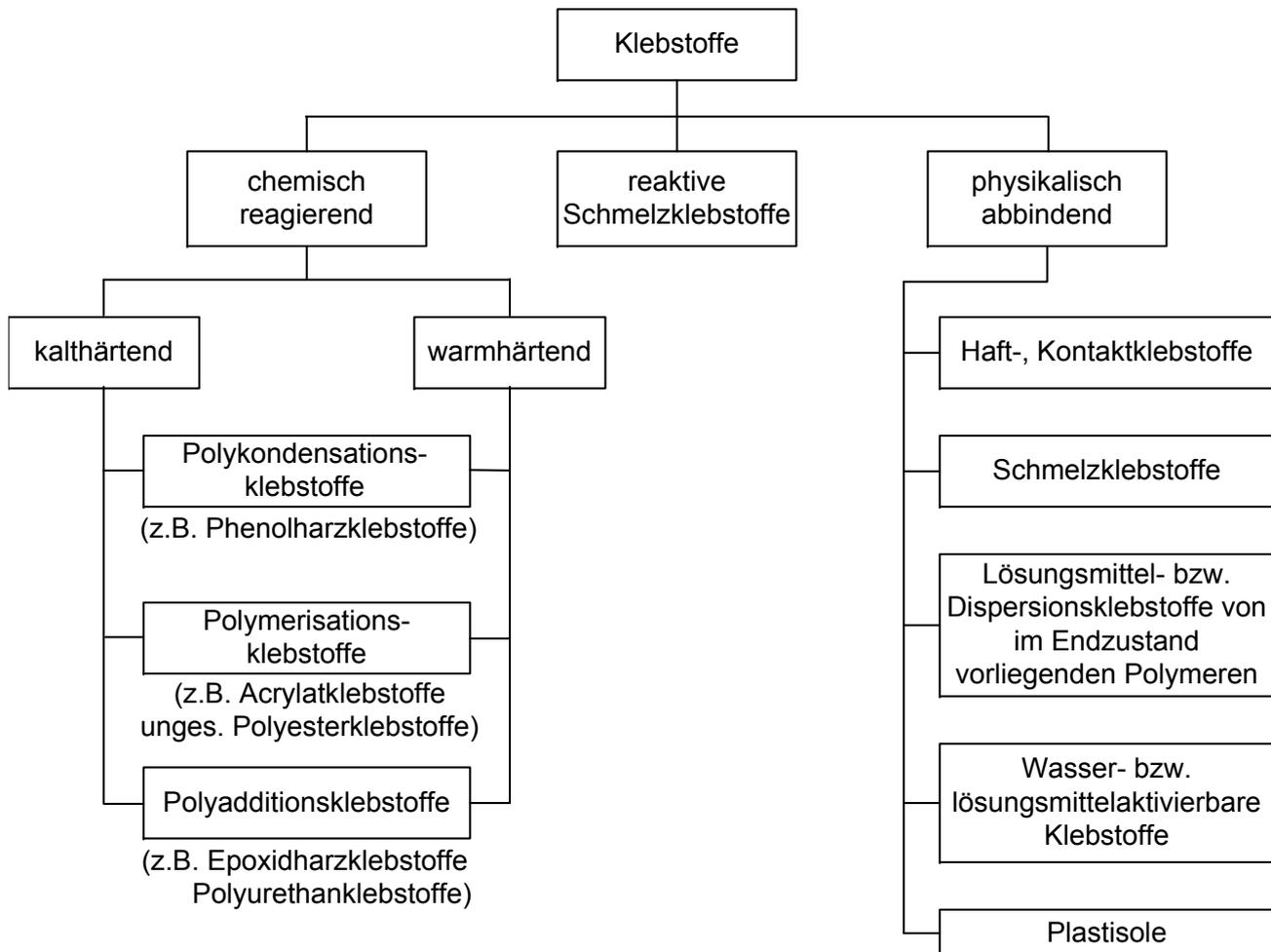


Abb. 2.18: Einflüsse auf das Kleben

### 2.9.1 Klebsysteme

Der Klebstoff ist üblicherweise eine organische Verbindung, die entweder über eine chemische Reaktion aushärtet oder physikalisch abbindet. Einen nach den Abbindemechanismen geordneten Überblick gibt Abb. 2.19.



**Abb. 2.19:** Gliederung der Klebstoffe nach dem Abbindemechanismus [14]

Vorteile des stoffschlüssigen Fügeverfahrens Kleben geben HABENICHT [14], EHRENSTEIN [32] und TUNKEL [9] an:

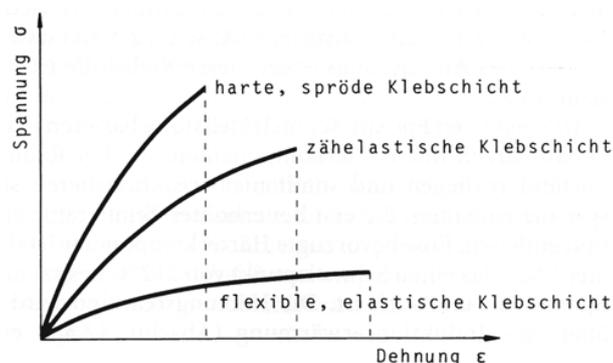
- Fügen unterschiedlicher Werkstoffe mit dünnen, großflächigen Bauteilverbindungen,
- keine Verletzung der Fügeteile notwendig,
- Möglichkeit des Ausgleichs von Passungstoleranzen,
- keine bzw. geringe thermische Beeinflussung der Fügeteilwerkstoffe,
- gleichmäßige Spannungsverteilung senkrecht zur Belastungsrichtung,
- schwingungsdämpfende und isolierende Eigenschaft der Klebschicht (z. B. Unterbindung elektrochemischer Korrosion zwischen CFK und Stahl),
- verminderte Kerbgefahr ermöglicht höhere dynamische Belastung,
- Gewichtsersparnis, Leichtbau,
- Kombination von Dichten und Fügen,
- Eignung für sehr kleine und dünne Teile,

- Zusatzwerkstoff zum Fügen ist unabhängig vom Fügeteilwerkstoff (im Gegensatz zum Schweißen) und durch die Vielfalt der organischen Polymere anpassbar und
- Festigkeitserhöhung in Verbindung mit Schrauben und Nieten (keine Spaltkorrosion).

demgegenüber sind als *Nachteile* anzuführen:

- Einfluss der Zeit auf den Verfahrensablauf,
- sorgfältige Prozesskontrolle erforderlich,
- zeitabhängige Eigenschaftsänderung der Klebschicht und Grenzschicht (Alterung, Empfindlichkeit gegen atmosphärische und chemische Einwirkung),
- geringe Schälwiderstände, Kriechneigung,
- schlechte Übertragung von Zugbelastung,
- Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile nötig,
- Demontagefreundlichkeit, nicht recyclinggerechte Konstruktion infolge Unlösbarkeit,
- begrenzte Reparaturmöglichkeit und
- aufwändige Festigkeitsberechnungen.

Zusätzlich zur Unterteilung nach den chemischen Grundlagen der Klebstoffe gibt es neben den starren Klebstoffen, zähelastische und flexible Klebschichten. Die prinzipiellen Unterschiede im Spannungs-Dehnungsverhalten zeigt Abb. 2.20. Die dargestellten Differenzen in möglichen Spannungs- als auch Dehnungshorizonten können allerdings viel extremer ausfallen, als es diese Grafik andeutet (Kap. 4.3, 4.4).



**Abb. 2.20:** prinzipielles Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Klebschichten mit unterschiedlichen Verformungseigenschaften [14]

Neben dem starren Dünnschichtkleben ergibt sich ein weites Anwendungsfeld für elastisches Dickschichtkleben mit niedermoduligen Klebstoffen mit den Vorteilen [37, 14, 38]:

- kontinuierliche Lasteinleitung,
- Kompensation von Produktionstoleranzen,  $t_{kleb} = 4 - 15 \text{ mm}$ ,

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

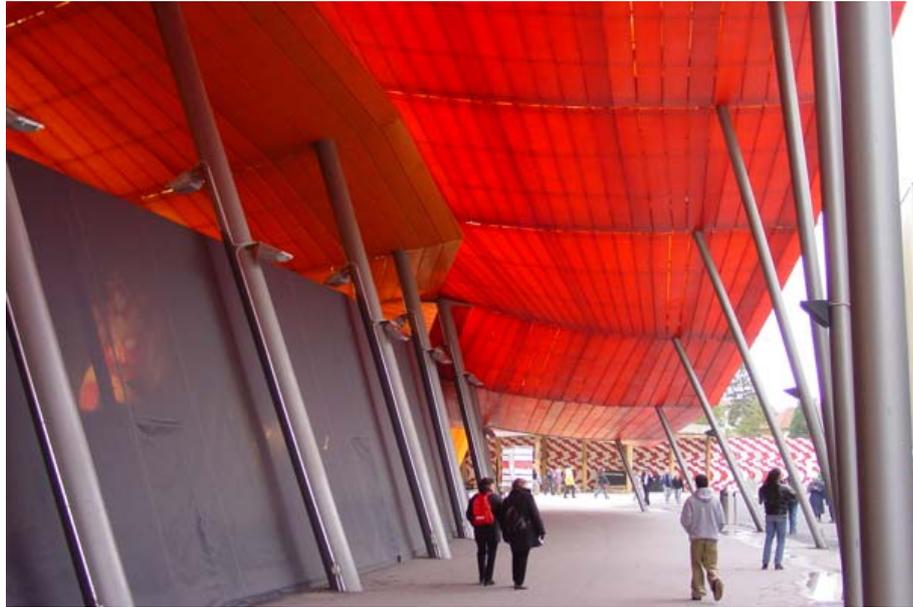
- Entkoppeln von lokalen Schwingungen, schwingungsdämpfend,
- gleichmäßige Spannungsverteilung,
- Überlappungslänge quasi-linear zur übertragenden Last dimensionierbar,
- quasi-homogene Spannungsverteilung führt zu weniger aufwändiger Festigkeitsberechnung,
- höhere Widerstandswerte bei Schälbeanspruchung,
- weitgehende Unabhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebstoffdicke,
- großflächiges Verbinden von Werkstoffen mit Ausgleich von temperaturinduzierten Dehnungen ( $\alpha_t \cdot \Delta T$ ),
- kalte Fügechnik, d. h. kein thermischer Verzug, keine Gefügeänderungen und
- keine Abzeichnung einer Klebnaht an der Bauteiloberfläche.

Die mechanischen Kennwerte von elastischen Dickschichtklebungen lassen sich auf teilweise enge Wertebereiche eingrenzen [14, 38]. Eine Übersicht zu den Kennwerten gibt Tabelle 2.1. Ein Beispiel für eine elastische linienförmige Verklebung mit Silikon von verschränkten U-Profilen und hutförmigen Profilen aus GF-UP ist die Sekundärtragstruktur der Dachkonstruktion des Forum Soft auf der EXPO.02 [39, 40] (Abb. 2.21).

Die *physikalisch abbindenden Klebstoffe* sind nicht für FVK aus Duromeren geeignet, da die Lösemittel durch die Diffusionsdichtigkeit und Unlöslichkeit der Füge Teile fast nicht entweichen können. Es kommen nur Klebstoffe mit vorwiegend adhäsiver Klebwirkung in Frage. Von den chemisch abbindenden, meist zweikomponentigen Klebstoffen, kommen in Betracht: Epoxide (EP), Methacrylate (MA bzw. MMA), Polyurethane (PUR) und für GF-UP das Laminierharz selbst, das ungesättigte Polyester (UP). Üblich für GFK und CFK sind, vor allem bei hoher zyklischer Belastung, Epoxide und Polyurethane. Letztere sind geeignet für Großserien, da sie ausreichend temperaturbeständig, haftfreudig und von sprödhart bis zähelastisch einstellbar sind.

mechanischer Kennwert	Wertebereich	Einheit
Klebfestigkeit (DIN EN 1465)	ca. 2 - 6	MPa
Bruchdehnung	ca. 200 - 600	%
Schubmodul	ca. 1 - 3	MPa
Zugfestigkeit	ca. 6 - 10	MPa
statische Langzeitbelastbarkeit	ca. 0,2 - 0,3	MPa
wahre Querkontraktionszahl	0,5	-

**Tabelle 2.1:** Bereiche mechanischer Kennwerte von elastischen Dickschichtverklebungen



**Abb. 2.21:** Forum Soft zur EXPO.02 (Yverdon-Les-Bains, CH) mit elastischen Verklebungen

*Ungesättigte Polyesterklebstoffe* bestehen aus in Styrol gelösten Polyesterharzen, wobei das Styrol in die markomolekulare Struktur integriert wird und nicht verdampfen muss. Der Styrolgehalt liegt bei 20 - 30 Prozent. Ein steigender Styrolgehalt erhöht die Verarbeitungsviskosität. Diese Polymerisationsklebstoffe eignen sich zum Verkleben von FVK, insbesondere von GF-UP [14]. Die Vernetzung erfolgt mit Peroxiden und Beschleunigern bei Raumtemperatur. Um die Steifigkeit an das Laminat anzupassen und eine pastöse Konsistenz zu erreichen, werden Füllstoffe (z.B. Celluloseflocken oder amorphes Siliciumoxid) und Kurzglasfasern beigemischt. Die Schrumpfung während der Vernetzung beträgt bis zu 10 %, sodass sich Spannungen in der Klebefuge aufbauen. Diese Wirkung muss bei der Anwendung berücksichtigt werden [32].

*Epoxidharzklebstoffe* sind Polyadditionsklebstoffe und üblicherweise zweikomponentig, wobei Monomer (Epoxidharz) und Härter (Amin) im genau definierten Gewichtsverhältnis zur Reaktion gebracht werden. Beide haben gleichermaßen einen großen Einfluss auf die resultierenden Eigenschaften der Klebschicht. Epoxidharzklebschichten können von sprödhart bis elastisch eingestellt sein. Sie verfügen über ein gutes Adhäsionsvermögen an den meisten Fügeartikelwerkstoffen sowie über eine hohe Alterungsbeständigkeit und weisen eine hohe Kohäsionsfestigkeit auf.

Besonders interessant zur Reduktion hoher Spannungsspitzen und zur Erhöhung der zyklischen Festigkeit, insbesondere der Schälfestigkeit, sind zähhart modifizierte Epoxidharzklebstoffe. Unter geringfügiger Beeinflussung der Glasübergangstemperatur und des

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Schubmoduls können über den Zusatz von kautschukelastischen Partikeln im Mikrometerbereich die Dehnfähigkeit und damit der Bruchwiderstand (Erhöhung Bruchenergie) wesentlich verbessert werden. Über eine chemische Reaktion mit einem bestimmten Flüssigpolymer werden die Zusätze in das Monomer eingebaut. Zähelastifizierungen sind auch bei Acrylat- und Polyurethanklebstoffen möglich [14].

*Methylmethacrylatklebstoffe* erhalten ihre Bezeichnung durch den sehr polymerisationsfreudigen Grundstoff Methylmethacrylat, dem Methylester der Methacrylatsäure. Die Reaktion erfolgt mit einem Peroxid als Härterkomponente und einem Beschleuniger auf Aminbasis. Es besteht keine mengenmäßige Abhängigkeit beider Reaktionspartner. Praktisch genügt ein Härteranteil von wenigen Prozent, um die Reaktion zu beginnen und in Gang zu halten. Die Klebfestigkeit ist nahezu unabhängig vom Härteranteil. Die Härtingszeit ist sehr kurz und oberhalb von 3% Härteranteil fast konstant und kann dann innerhalb einer Minute abgeschlossen sein. Um praktikable Topfzeiten zu erhalten, haben sich drei verschiedene Mischungsmöglichkeiten von Monomer, Härter und Beschleuniger entwickelt. Im A-B-Verfahren wird einmal Monomer und Beschleuniger vorgemischt und einmal Monomer und doppelte Härtermenge gemischt. Beide Teile sind lagerfähig und werden entweder unmittelbar vor dem Auftrag auf die Füge-teile vermischt oder zu gleichen Anteilen jeweils auf eine Füge-teilfläche aufgetragen und beim Fügen vermischt. Vorteile dieses Verfahrens sind die einfache Mischung von A und B im Verhältnis von 1:1 und größere Klebschichtdicken bis 3 mm. Im Härterlack-Verfahren wird der Härter einseitig mittels eines leichtflüchtigen Lösungsmittels auf ein Füge-teil aufgetragen und bleibt lagerstabil. Beim Kleben wird die Monomer-Beschleuniger-Mischung auf das andere Füge-teil aufgetragen und die Reaktion beginnt mit dem Fügen der Teile. Nachteile sind die geringen realisierbaren Klebschichtdicken von 0,3-0,4 mm, da die Reaktion nur von einer Seite aus initiiert wird. Beim Verfahren des direkten Härterzusatzes wird in das vorbeschleunigte Monomer der Härter als Paste oder Pulver mit einer Menge von 1-3% eingemischt und sofort verklebt. Auf eine ausreichende Durchmischung ist zu achten. Zähnharte Systeme mit erhöhter Klebfestigkeit werden über die chemische Einbindung von Kautschuksystemen erreicht (s. EP-Klebstoffe). Die Vorteile liegen in der einfachen Handhabbarkeit durch Unempfindlichkeit des Systems bezüglich der Dosiergenauigkeit sowie der schnellen Aushärtung bei hoher Klebfestigkeit selbst bei fetthaltigen Oberflächen [14].

*Polyurethanklebstoffe* enthalten als Grundstoff eine Isocyanatkomponente, weshalb man auch von Isocyanatklebstoffen spricht. Es sind hochreaktive Polyadditionsklebstoffe, deren Lagerung vor einer Klebung unter Ausschluss von Feuchtigkeit zu erfolgen hat.

Eine hohe Vernetzungsdichte ist für hohe Festigkeit und Wärmebeständigkeit erforderlich. Zur Verbesserung der Klebschichtflexibilität ist eine Mischung aus Isocyanat und Epoxid möglich. Die zweite Komponente ist ein Polyol, bevorzugt ein Polyesterpolyol, das wegen der hohen Polarität für eine sehr gute Adhäsion des Klebstoffes sorgt. Die Gruppe der Polyurethanklebstoffe deckt einen weiten Bereich von Klebstoffsystemen ab. Feuchtigkeitshärtende Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe benötigen einen Feuchtigkeit Zutritt zur Klebefuge durch mindestens 40% relative Luftfeuchte in den Werkstätten. Großflächige Klebungen von feuchtigkeitsundurchlässigen Füge­teilen sind problematisch. Zweikomponenten-Polyurethanklebstoffe benötigen wie die 2K-EP-Klebstoffe eine genaue Einhaltung der stöchiometrischen Verhältnisse der Reaktionspartner. Für vollkommene Vernetzung wird allerdings mit geringem Isocyanatüberschuss gearbeitet. Bei der Aushärtung der 2K-Systeme spielt die Luftfeuchtigkeit keine Rolle. Außerdem sind u.a. Polyurethan­dispersionen, reaktive Polyurethan-Schmelz­klebstoffe, lösungsmittelhaltige als auch thermisch aktivierbare Polyurethanklebstoffe gebräuchlich [14].

Klebstoffe haben als polymere Werkstoffe temperaturabhängige Festigkeitseigenschaften, die außerdem von der Belastungsgeschwindigkeit abhängen. Über eine einheitliche Zustandsgleichung lässt sich dieses Verhalten für die Klebstoffe allgemein nicht beschreiben [14]. Die entscheidende Kenngröße der Polymere in diesem Zusammenhang ist die *Glasübergangstemperatur*  $T_g$ . Bei Beanspruchungen einer Klebschicht oberhalb von  $T_g$  lassen sich wegen des starken Abfalls des E-Moduls keine bleibenden Spannungen ausbilden, da die Moleküle frei verschiebbar sind. Nur unterhalb von  $T_g$  liegt unter den Molekülen eine weitgehende Strukturfixierung vor, die für einen quasi-linearen Zusammenhang von Elastizitätsmodul und Temperatur sorgt. Soll eine Klebeverbindung erhöhten Temperaturen ausgesetzt werden, ist auf den Temperatureinsatzbereich der Klebstoffformulierung zu achten bzw. ein Klebstoff mit entsprechend hoher Glasübergangstemperatur zu wählen.

Die Vielfalt an Klebstoffsystemen und deren Variationen schließen eine pauschale Produkt­empfehlung zunächst aus. Wie die Zugscherversuche in Kap. 4.3 zeigen, sind hochfeste Klebstoffe mit ausgezeichneten Haftungseigenschaften und hohem Dehnvermögen bevorzugt auszuwählen.

Es stehen verschiedene Varianten der Aushärtung von Klebstoffen zu Verfügung. Kaltaushärtende Klebstoffe sind im Zusammenhang mit großformatigen Bauteilen einfach in der Handhabung. Warmhärtende Klebstoffe ergeben oft hochwertigere Verklebungen, vor allem mit Blick auf die Temperaturbeständigkeit. Die Taktzeit in Verklebungsserien lässt sich durch die stark verkürzte Aushärtungsdauer einer Warmhärtung wesentlich erhöhen. Die Warmhärtung kann einerseits über ein Tempern des gesamten Bauteils erfolgen oder

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

durch lokale Erwärmung der Verklebung. Bei allen Arten der thermischen Behandlung einer Verklebung muss auf die Temperaturbeständigkeit und das Verformungsverhalten der Füge-  
teile geachtet werden. Besonders günstig sind Erwärmungsverfahren, die möglichst wenig  
Wärmeenergie eintragen und nur den Klebstoff erwärmen. Für punktuelle Klebungen von  
Stahlteilen kommt beispielsweise die Induktionshärtung in Frage. Elektrisch leitfähige Füge-  
teile lassen sich durch den induzierten Wirbelstrom und ferromagnetische Metalle zusätzlich  
durch die Wirkung des Magnetfeldes erwärmen. Neben der Erwärmung der Klebschicht  
über das Füge-  
teil können auch entsprechend leitfähige Partikel in den Klebstoff eingebracht  
werden. Sie erzeugen eine besonders gleichmäßige Erwärmung. Auf diese Weise können  
auch elektrisch nicht leitende Materialien über Warmhärtung lokal geklebt werden.

Die Klebung soll mit 0,015 - 0,07 MPa zur Fixierung angepresst werden [32], sodass sich für  
eine Klebefläche von 10×10 cm eine Kraft von 150 bis 700 N ergibt. HABENICHT beziffert in  
[14] die Anpressdrücke für Polykondensationsklebstoffe auf 0,7 - 1,5 MPa, für Polyadditions-  
und Polymerisationsklebstoffe auf 0,1 - 0,5 MPa, für Fixierungshilfen auf 0,05 - 0,25 MPa und  
gibt für das Anpressen folgende Gründe an:

- Austreiben von Wasser bei Polykondensationsklebstoffen bzw. Lösungsmitteln bei  
Lösungsmittelklebstoffen,
- Verbesserung von Adhäsion und Haftfestigkeit durch verringerten Molekül-  
abstand der  
Klebstoff- und Füge-  
teilerflächen,
- Vergrößerung der wirksamen Oberfläche durch verbesserte Benetzung und somit  
Erhöhung der Festigkeit, aber auch eintretender Festigkeitsrückgang nach Überschrei-  
tung eines Optimums durch Auspressen des Klebstoffes aus der Fuge und direkten  
Oberflächenkontakt der Füge-  
teile, das zu Diskontinuitäten in der Klebschicht führt,
- Fixierung der Füge-  
teile und Verhindern eines Abgleitens infolge der Schmierwirkung  
des noch flüssigen Klebstoffs und
- Erzielen gleichmäßiger Klebschichtdicken.

Für die höchste Klebfestigkeit sollte die oberflächennahe Faserlage dieselbe Ausrichtung  
besitzen wie der zu übertragende Kraftfluss [32]. Eine klebgerechte Konstruktion erfordert  
einen geeigneten Klebstoff für dauerhafte und hochbelastbare Klebverbindungen. HABE-  
NICHT gibt in [14] folgende optimale Eigenschaftskriterien für Klebschichten an:

- Ausbildung fester und alterungsbeständiger Haftungskräfte zu Füge-  
teilerflächen,
- geringe Kriechneigung bei Zeitstandsbelastung,
- hohe thermische Beständigkeit,

- hohe Kohäsionsfestigkeit bei gleichzeitigem Vorhandensein eines begrenzten Verformungsvermögens als Voraussetzung für die Reduktion von Spannungsspitzen in der Klebefuge und
- hohe Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit und Angriff korrosiver Agenzien.

### 2.9.2 Haftung

Die Benetzbarkeit einer Oberfläche mit dem Klebstoffsystem und adhäsionsfreundliche Eigenschaften der Fügeteile sind wesentliche Voraussetzungen für die Haftung des Klebstoffes. Die Haftung auf dem Fügeteil (Adhäsion) hängt von der Rauigkeit, Löslichkeit und der chemischen Beschaffenheit der einzelnen Oberflächen, aber auch von deren Sauberkeit ab. Die Adhäsion kann durch Mechanismen der Verklammerung zwischen Fügeteiloberfläche und Klebstoff (mechanische Adhäsion) oder durch gegenseitiges Durchdringen von Polymermolekülen von Fügeteil und Klebstoff aktiviert werden. Die Bindung der Klebstoffmoleküle an die Fügeteiloberfläche geschieht einzeln oder durch Kombination von [32]:

- van der Waals-Kräften (Dipol-, Induktions- und Dispersionskräfte [14]),
- kovalente Bindungen,
- Wasserstoffbrücken (H-Brücken),
- ionische Bindungen.

Obwohl *van der Waals-Kräfte* in jedem Klebstoffsystem auftreten und zum Anziehen von Fügeteil und Klebstoff führen, ist diese Anziehung nach vorherrschender Ansicht in technischen Systemen meist unbedeutend. Ausnahmen ergeben sich dann, wenn sich sehr flache und saubere Oberflächen mit dem Klebstoff großflächig in engem Kontakt befinden.

*Kovalente Bindungen* können durch chemische Reaktion zwischen Klebstoff und Fügeteil entstehen. Sie gelten generell als effizienteste der Bindungsarten zwischen Klebstoffmolekülen und Fügeteiloberflächen. Reaktive Klebstoffe, z.B. auf Basis von Epoxiden oder Isocyanaten, können vor ihrer Aushärtung grundsätzlich mit den Oberflächen von Polyamid, Polyurethan und Epoxidharzformteilen reagieren. Kunststoffe wie PE, PP, PTFE und PVDF sind unbehandelt nicht zu kovalenten Bindungen mit Klebstoffen befähigt. Die kovalente Bindung beruht auf der Austauschwechselwirkung der Valenzelektronen der Bindungspartner und wird durch ein Elektronenpaar vermittelt, das den beiden miteinander verbundenen Atomen gemeinsam gehört [14].

*Wasserstoffbrücken* sind zwischen Klebstoffen u.a. auf der Basis von Epoxiden und 2K-Polyurethanen und Fügeteilen auf der Basis von Polyamiden, Polyurethanen und Epoxidharzen zu erwarten. Die Bindungsenergie von Wasserstoffbrücken ist mäßig.

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Damit eine *ionische Bindung* zustande kommen kann, müssen sowohl die Klebstoffmoleküle als auch die Fügeiteiloberfläche ionische Einheiten enthalten. Allerdings sind eigentlich alle gebräuchlichen Klebstoffe selbst elektrisch neutral. Ionische Polymere, die für eine Haftung durch ionische Bindungen mit geeigneten (d.h. ionischen) Klebstoffen prädestiniert wären, sind technisch von relativ geringer Bedeutung [32].

Zusammenfassend kann die adhäsive Verbundwirkung vor allem auf die Wirkung kovalenter Bindungen zurückgeführt werden.

Nach [14] liegt der *Wirkungsbereich der Adhäsion* zwischen 0,1 - 1 nm. Es muss zunächst gewährleistet sein, dass die Moleküle und Atome von Fügeiteilwerkstoff und Klebstoff in die Lage versetzt sind, sich in diesem Bereich zu nähern. Daraus lässt sich die Notwendigkeit der Oberflächenvorbehandlung erkennen. Eine mit Staub oder Feuchtfilm belegte Oberfläche kann demnach kaum noch Adhäsionskräfte ausbilden.

Zwei wichtige Kenngrößen, die *Viskosität* und die *Benetzbarkeit*, beeinflussen die Annäherung von Klebstoff und Fügeiteil auf das für die Adhäsionswirkung erforderliche Maß. Die Viskosität des Klebstoffes beschreibt die Konsistenz und damit die Fähigkeit in Oberflächenrauigkeiten einzudringen. Die breite Palette der Klebstoffe deckt alle Konsistenzen ab.

Die zweite Eigenschaft ist die *Benetzbarkeit von Oberflächen*. Maßgeblich für eine optimale Benetzung ist der sich in der Grenzfläche ausbildende Energiezustand. Die Oberflächenenergie [ $mJm^{-2}$ ] entspricht der Oberflächenspannung [ $mNm^{-1}$ ] und beschreibt die Energie, die nötig ist, um 1  $cm^2$  Oberfläche einer Flüssigkeit neu zu bilden. Die Oberflächenspannung bestimmt sich aus den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit und der Art des umgebenden Mediums. Der Klebstoff soll eine kleine Oberflächenspannung im Vergleich zu einer hohen Oberflächenenergie des zu verklebenden Festkörpers besitzen [41].

Hochenergetische Oberflächen sind besser zu benetzen als niedrigenergetische. An diesem Punkt setzen die physikalischen Oberflächenvorbehandlungen an (Kap. 2.9.3). Zum Vergleich hat ausgehärtetes Epoxidharz theoretisch eine Oberflächenenergie von nur 47  $mJm^{-2}$  und Eisen dagegen den Höchstwert von 2550  $mJm^{-2}$ . Anschaulich lässt sich die Benetzbarkeit mit einem Prüflüssigkeitstropfen und dessen Randwinkel am Kontaktpunkt zur Oberfläche demonstrieren. Winkel kleiner als 30° ergeben gute bis sehr gute Benetzbarkeiten. Eine Oberflächenbehandlung, die einen gleichmäßigen Wasserfilm (Spreitung) aus demineralisiertem Wasser ermöglicht, kann als ausreichend angesehen werden, weil die Oberflächenenergie von Wasser mit 72,8  $mJm^{-2}$  über der der Klebstoffe liegt [14].

Eine Verbesserung der Fügehaftung kann z.B. über Aufrauen erreicht werden. Ebenso kann man die gleiche Haftung verbessern indem man gezielt die Oberflächenenergie z.B. durch Plasma- oder Elektronenbestrahlung erhöht [14] (Kap. 2.9.3). Der Erfolg einer Klebung hängt von der Oberflächenvorbereitung ab, die eine ausreichende Aktivierung der Oberfläche bewirkt. Die Vorbehandlung ist an den Fügepartwerkstoff spezifisch gebunden und nicht an den Klebstoff. Die beste Wirkung versprechen submikroskopische Aufrauungen, die energiereiche Haftstellen freilegen. Die mit einer Aufrauung verbundene Oberflächenvergrößerung ist von untergeordneter Bedeutung [41].

Beim Verkleben von Kunststoffen ergibt sich das Problem, dass die Oberflächenenergien von Fügepart und Klebstoff in der gleichen Größenordnung liegen und man generell von geringer Benetzungsfreundlichkeit ausgehen muss. Da die Oberflächenenergien auch vom Reinheitsgrad der Oberflächen abhängen, werden in der Praxis die tatsächlichen Energien unter den Literaturangaben liegen. Eine Berechnung ist nicht möglich, sodass nur eine experimentelle Bestimmung mit einem Satz unterschiedlicher Testflüssigkeiten in Frage kommt.

### 2.9.3 Oberflächenbehandlungen

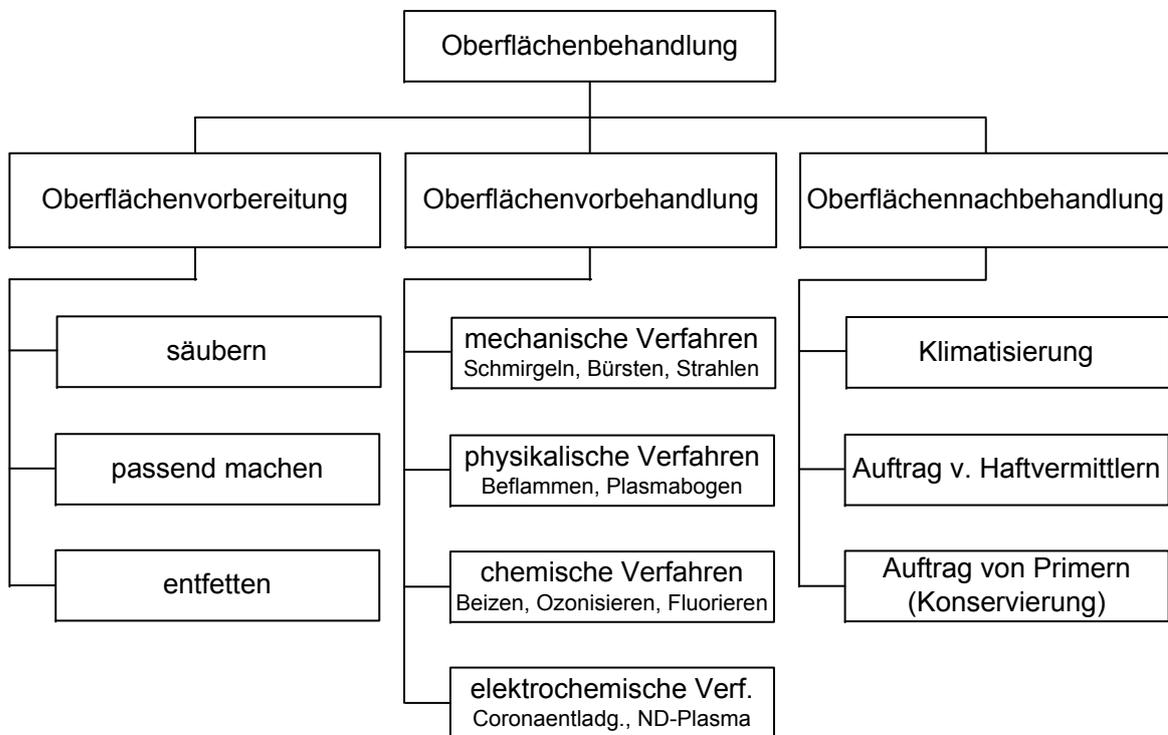


Abb. 2.22: Verfahren der Oberflächenbehandlung [14]

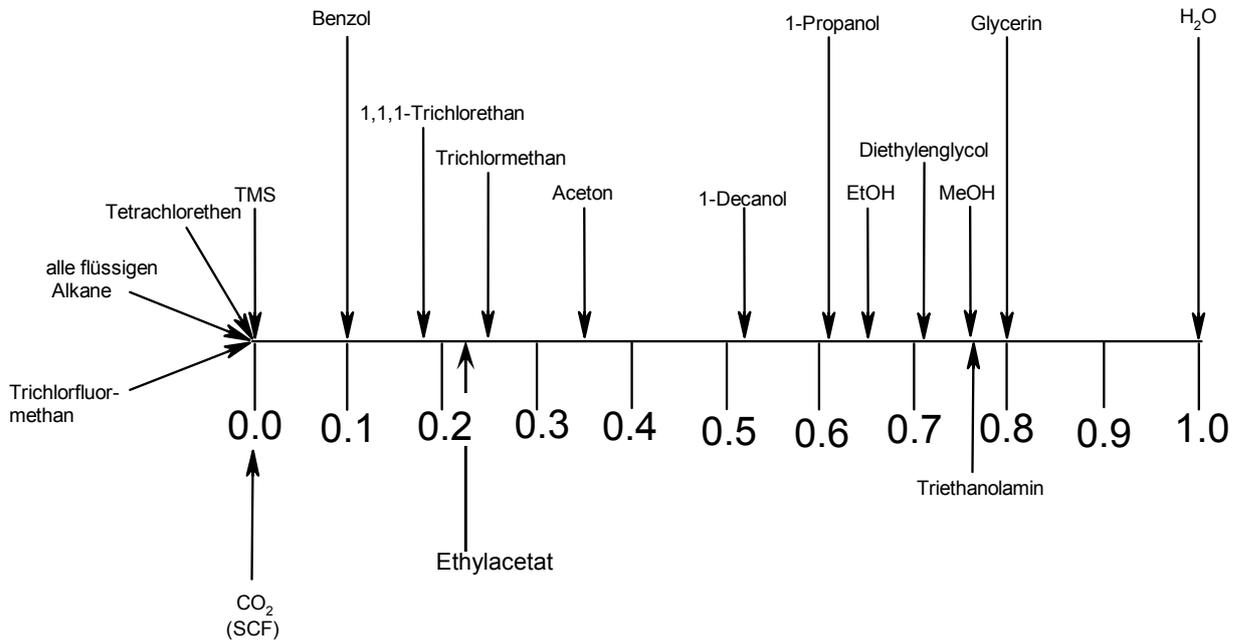
## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Nach der Oberflächenvorbereitung wird durch Oberflächenbehandlungen eine Oberfläche erzeugt, die der chemischen Natur der Füge­teile entspricht, was man über die mechanischen Verfahren erreicht (Abb. 2.22), oder es kann eine neue Oberfläche mit definierten Haftungsbedingungen erzeugt werden, die durch Hauptvalenzbindungen an den Grundwerkstoff anschließt. Hierzu werden die physikalischen, chemischen bzw. elektrochemischen Verfahren eingesetzt [14, 42].

Die Oberflächen von FVK sind wie für alle Kunststoffe vor dem Kleben zu behandeln. Ein einfaches Reinigen und Entfetten ist sinnvoll und unkritisch. Neben dem Reinigen hat die Vorbehandlung die Aufgabe, die Oberflächen zu aktivieren. Die Fasern dürfen bei der Oberflächenvorbehandlung nicht zerstört werden. Ein Aufschließen der Faserstränge durch Schleifen, Bürsten oder Strahlen führt einerseits zu Tragfähigkeitsverlusten im Laminat, andererseits zu stark vergrößerter und schwer benetzbarer Oberfläche, sodass mit erhöhtem Klebstoffverbrauch und dem Einschluss von kleb­festigkeitsmindernden Luftblasen an der Grenzschicht gerechnet werden muss. Es wird deshalb von EHRENSTEIN [32] empfohlen, die mechanischen Vorbereitungen so schonend wie möglich zu gestalten und auf die Entfernung der festigkeitshemmenden Oberflächenschichten (Silikone, Stearate, etc.) durch leichtes Anschleifen oder Strahlen mit geringem Druck zu beschränken.

Beim Reinigen von Oberflächen sollte die Art der Kontamination bekannt sein. Nach SCHLIMMER [43] werden die Kontaminationen in polar und unpolar unterschieden. Als unpolare Kontamination einer Klebeoberfläche sind z. B. Öle, Kühlschmiermittel aus der mechanischen Bearbeitung und Trennmittel zu nennen. Die Verunreinigungen können am besten mit Lösungsmitteln gleicher Polarität entfernt werden. Eine Übersicht zu möglichen Lösungsmitteln und deren Einordnung nach der Polarität gibt Abb. 2.23. Die Polarität wurde zwischen Wasser mit 1,0 und Tetramethylsilan (TMS) mit 0,0 normiert. Versuche von [43] zeigen, dass unpolare Verschmutzungen mit Aceton (0,35) nicht so gut entfernt werden wie mit Ethylacetat (0,22), das als deutlich unpolarer einzuordnen ist. Eine Steigerung der Kleb­festigkeit ließ sich gegenüber einer Acetonreinigung nachweisen.

Sofern die Technik zur Verfügung steht, ermöglichen die physikalischen Verfahren (Abb. 2.22) Coronabeflammung und Niederdruckplasma eine effektive Verbesserung der Benetzungseigenschaften durch das Einlagern von Sauerstoff in der Füge­teilerfläche. Mit diesen Verfahren kann ein sehr hoher Arbeitsfortschritt unter Einsparung der Arbeitsschritte Säubern und Entfetten erreicht werden. Ein technisch einfacheres Verfahren, das ebenfalls für eine Anreicherung von Sauerstoff in der Oberfläche sorgt, ist das kurzzeitige Beflammen mit einer Gas-Sauerstoff/Luft-Flamme (Kreidl-Verfahren). Als Brenngase kommen Methan, Propan oder Butan zum Einsatz. Das Verfahren nutzt die chemische Aktivität im



**Abb. 2.23:** normierte Lösungsmittelpolaritäten [43]

oxidierenden Flammenbereich der sog. Sekundärflamme [14].

Definiert raustrukturierte und sehr saubere Oberflächen lassen sich bei Laminaten mit Abreißgeweben erreichen, die das Laminat nach außen zunächst abschließen und kurz vor dem Kleben wieder heruntergerissen werden.

Wiederholt wird in der Literatur berichtet, dass vor allem bei der Verwendung von elastischen Dickschichtklebungen beste Klebeergebnisse mit glatten gereinigten GFK-Flächen erzielt werden [38].

*Haftvermittler* verbessern die Haftungseigenschaften von Klebschichten über die Bildung „chemischer Brücken“ meist auf Basis von siliciumorganischen Verbindungen (Silane), die kovalente Bindungen mit der Fügeoberfläche eingehen und die Klebfestigkeit und Alterungsbeständigkeit gegenüber feuchter Atmosphäre erhöhen. Der Auftrag von Haftvermittlern stellt einen eigenen Arbeitsgang dar. Ein Zusetzen der Haftvermittler zum Klebstoff ist möglich. Haftvermittler können in Kombination mit mechanischen Oberflächenvorbereitungsverfahren die chemischen Verfahren ersetzen.

Als handwerklich praktikable Oberflächenvorbehandlung für GFK hat sich das Entfetten mit Aceton oder Tensiden herausgestellt. Anschließend folgt ein vorsichtiges Aufrauen mit Bürsten oder Schleifvlies bzw. Sandpapier, das günstigerweise nass ist und in Kombination

mit ATA verwendet wird. ATA ist ein haushaltsüblicher, mit Tensiden versetzter Scheuersand. Nach der Schleifstaubentfernung folgt wieder ein Entfetten mit Aceton. Die Klebung sollte sofort erfolgen. Das sofortige Kleben ist erforderlich, weil an energiereichen und reaktionsbereiten Oberflächen schnell Staub- und Feuchtigkeitsmoleküle anhaften, die die Reaktivität verringern.

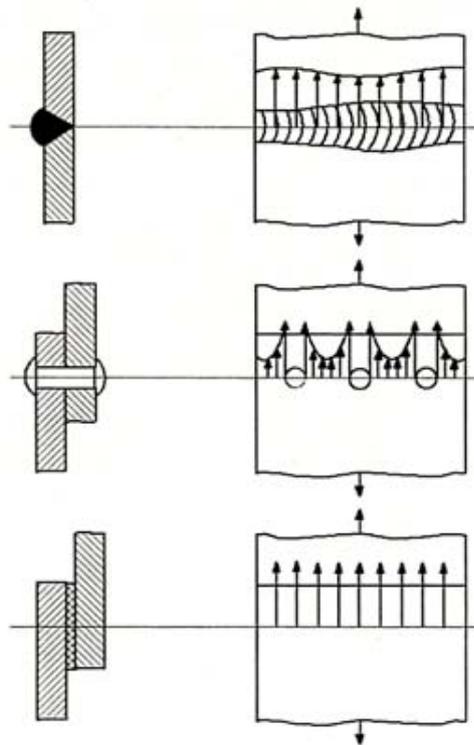
Mit Säubern, Entfetten und einem mechanischen Vorbehandeln ergeben sich ausreichende Kurzzeitfestigkeiten. Langzeitige Alterungsbeständigkeiten kombiniert mit mechanischen Belastungen erfordern die erheblich aufwändigeren chemischen oder elektrochemischen Verfahren, eventuell ergänzt durch Haftvermittler oder Primer [14].

### 2.9.4 Beanspruchungen und Konstruktion einer Verklebung

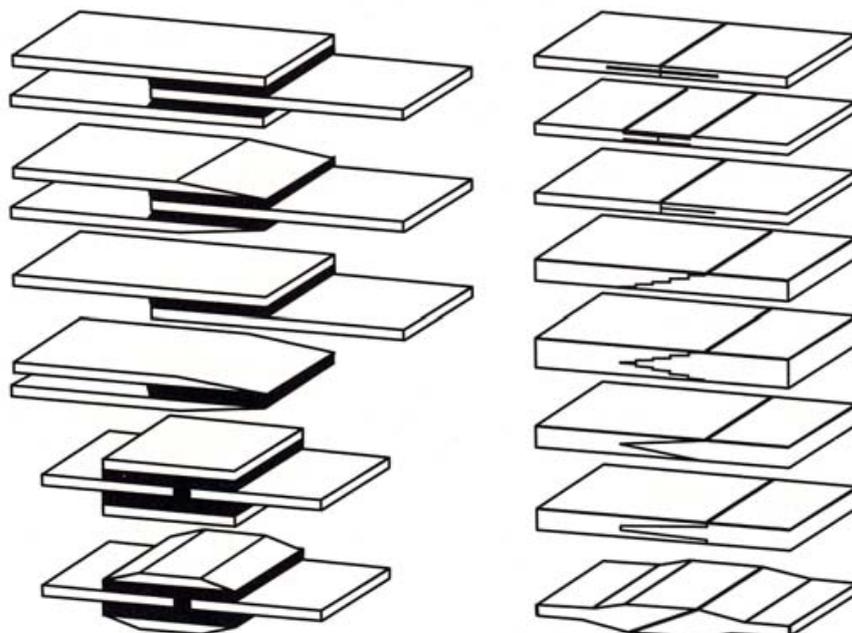
Die Spannungsverteilung in durchgehenden Klebefugen ist gegenüber anderen Verbindungsvarianten entlang der Fügekante gleichmäßig (Abb. 2.24) und somit von Vorteil [32]. Allerdings beeinflussen nicht nur die zu übertragenden Kräfte, sondern auch die Steifigkeit, also der E-Modul der Fügepartner, die Spannungsverteilung entlang der Klebefuge in Krafrichtung. Unverstärkte Kunststoffe verhalten sich in Kombination mit verklebten Stahlteilen in dieser Hinsicht ungünstiger als verstärkte, da der E-Modul im ersten Fall bis zu zwei Zehnerpotenzen unter dem des Stahles liegt. Im anderen Fall erreicht man Steifigkeiten, die teilweise im Bereich der Metalle liegen, z. B. Pultrusionsprofile [44] aus GFK oder allg. CFK-Bauteile. Klebstoffe mit höherem Schub- und Elastizitätsmodul erzeugen auch höhere Normal- und Schubspannungen in der Klebschicht.

Ordnet man mögliche Klebverbindungsformen nach ihrer Leistungsfähigkeit, muss zuerst die zweischnittig überlappte Verbindung genannt werden und anschließend in absteigender Reihenfolge die abgesetzte, geschäftete und einschnittig überlappte. Mit CFK erreicht man höchste Tragfähigkeiten mit zweischnittig abgesetzten oder geschäfteten Verbindungen (Abb. 2.25). Mit Blick auf die in Kap. 3.2 vorgeschlagene Verbindungslösung werden nachfolgend ausschließlich die einfach überlappten Verbindungen betrachtet.

Günstig für die Belastbarkeit einer Klebeverbindung ist eine plastische Verformbarkeit der hochbeanspruchten Randbereiche im Klebstoff. Erreichen lässt sich dieser Zustand durch eine hohe Vorbelastung vor der endgültigen Aushärtung des Klebstoffs oder durch den Einsatz verschiedener Klebstoffe in einer Fuge. Zusätzlich kann über die mehr oder weniger aufwändig gearbeitete Gestalt der Verbindung die Tragfähigkeit gesteuert werden (Abb. 2.25).



**Abb. 2.24:** Spannungsverteilung in geschweißten, genieteten und geklebten Verbindungen längs der Bauteilfuge [32]



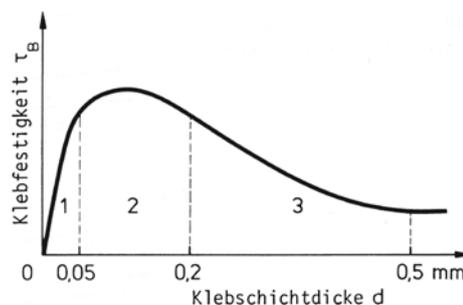
**Abb. 2.25:** Gestaltung mechanisch belasteter Klebverbindungen [32]

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Grundsätzlich muss man zwischen reinen Kunststoffverklebungen und kombinierter Kunststoff/Metallverklebung (Kap.3.5) unterscheiden, da sich die Verformbarkeit der Verbindungen erheblich unterscheiden. Unabhängig davon unterscheidet sich das Verformungsgesetz der Klebstoffsubstanz vom Verformungsverhalten der Klebschicht, sodass eine vorbehaltlose Übertragung der Eigenschaften nicht möglich ist [41].

Für reine Kunststoffverklebungen wird als günstige Überlappungslänge einer einschnittigen Überlappung 5 - 10 fache Fügeteildicke empfohlen. Eine äußere Schäftung der Fügeteile führt zu verringerten Schälbeanspruchungen, da die Biegesteifigkeit der Fügepartner lokal abnimmt [45, 14].

Durch plastische Verformung der Klebstoffe steigen die maximalen Spannungen nach Überschreitung des linear-viskoelastischen Bereichs bei weiterer Verformung nur leicht an [46]. Mit wachsender Klebschichtdicke nehmen Bruchkraft und Schubfestigkeit ab, während der Schubmodul ansteigt und sich einem Grenzwert nähert. Dagegen bewirken steigende Temperaturen und zunehmende Spannungen eine nichtlineare Abnahme des Schubmoduls einer Klebschicht [41]. Am Rand der Fügeteile in Krafrichtung nimmt die Schubspannung im Klebstoff deutlich zu. Aus den unterschiedlichen Schubverformungen resultieren bereits geringe Schälbeanspruchungen.

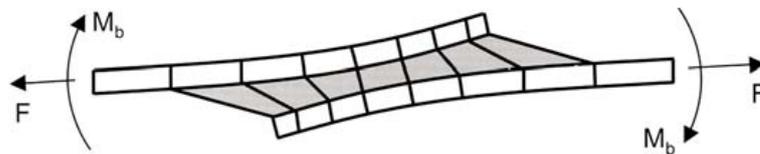


**Abb. 2.26:** Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke [14]

Die Scher- und Schälfestigkeiten sind stark von der Klebschichtdicke abhängig. Mit zunehmender Klebschichtdicke reduzieren sich die Festigkeitswerte, da die Eigenfestigkeit der Klebschicht gegenüber der Adhäsion an Bedeutung gewinnt und die tatsächliche Festigkeit bestimmt. Die erreichbare Festigkeit sinkt somit bei steigender Klebschichtdicke [32]. Optimale Klebschichtdicken werden von EHRENSTEIN [32] mit 0,05 mm für Cyanacrylate und 0,2 mm für kalt- und warmhärtende Epoxide, Polyester und Polyurethane angegeben. TRUMPF empfiehlt in [47] ebenfalls 0,2 mm, BERGMANN in [36] 0,1 - 0,2 mm. Für Oberflächenrauigkeiten von 30 - 70  $\mu\text{m}$  ergeben sich günstige Klebschichtdicken mit 0,05 - 0,2 mm. Ideale Rauheit liegt bei 50  $\mu\text{m}$ . Die Klebschichtstärke

sollte mindestens der Rauheit entsprechen [14]. Laut [32] liegt eine günstige Klebstoffauftragsmenge bei 200 bis 400 g/m<sup>2</sup>, die bei einer Rohdichte von 1,0 bis 1,5 g/cm<sup>3</sup> zu Fugendicken von 0,15 bis 0,35 mm führt.

Asymmetrische Klebungen, wie die einfach überlappte Klebung, erhalten durch das zusätzliche Biegemoment aus der Anschlusskonzentration (Abb. 2.27) deutlich erhöhte Schälbeanspruchungen und folglich geringere Tragfähigkeiten im Vergleich zu einer symmetrischen Klebegeometrie.

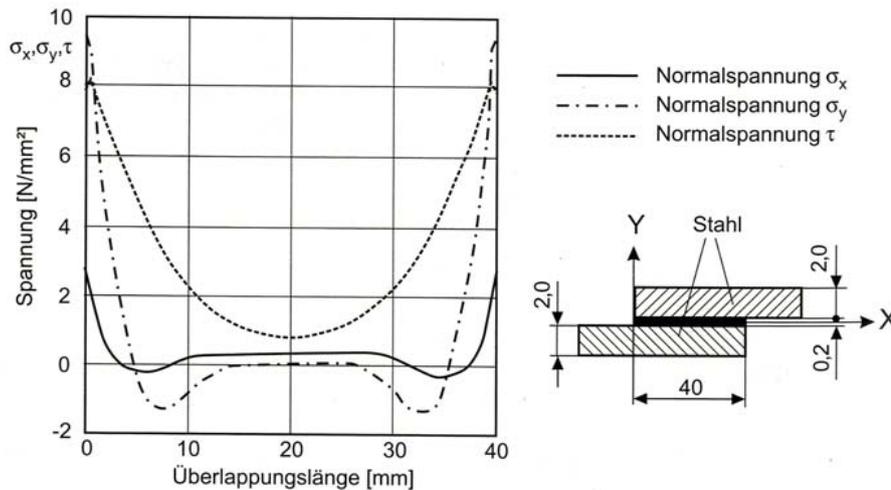


**Abb. 2.27:** Schälende Normalspannungen am Klebeverbindungsende infolge Anschlussmoment bei einfacher Überlappung [32]

Betrachtet man den Spannungsverlauf in Überlappungsrichtung wird eine große Inhomogenität deutlich. Die Überlappungsenden weisen Spannungsspitzen auf (Abb. 2.28). Einflussparameter sind Überlappungslänge, Fügeteilfestigkeit, E-Modul von Klebstoff und Fügeteilen sowie Dicke der Fügeteile. Die Festigkeit der Verklebung steigt mit zunehmender Fügeteilfestigkeit, da lokale plastische Dehnungen metallischer Fügeteile, die den Klebstoff überbeanspruchen, erst später auftreten. Bei einschnittig überlappten Klebungen vergrößern hohe E-Modulwerte der Fügeteile und die Fügeteildicken den Biege­widerstand gegen eine Verformung (Verdrehung), die der außermittige Lastangriff hervorruft. Eine größere Fügeteildicke erhöht linear die Anschlussmomente, aber die Biegesteifigkeit wächst gleichzeitig mit der dritten Potenz. Mit Vergrößerung der Fügeteildicke lässt sich somit bei einschnittigen Klebeverbindungen die Klebfestigkeit erhöhen, bzw. die Spannungen in der Klebschicht nehmen ab. Folglich nehmen auch die Spannungen in den Fügeteilen ab. Besonders an den Rändern der Fügeteile in Krafrichtung steigt die Beanspruchung unterproportional zur Fügeteildicke an MONIATIS [46].

Steigende Temperaturen wirken sich ungünstig auf die Klebfestigkeit aus, weil die mechanischen Eigenschaften von Klebstoff und Kunststofffügeteil ebenso wie die Wechselwirkungen an den Grenzschichten herabgesetzt werden. Luftfeuchtigkeit als eine mögliche schädliche Chemikalieneinwirkung kann über den Kunststoff selbst aber vor allem über die Grenzschichten eindringen und die Adhäsion schwächen. Ein gesonderter Schutz der Überlappungsenden kann sinnvoll sein [32].

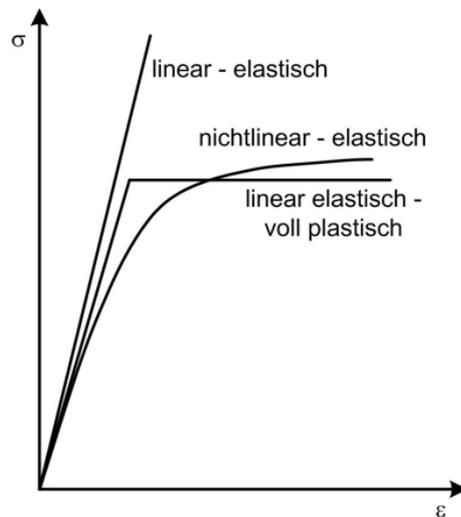
## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen



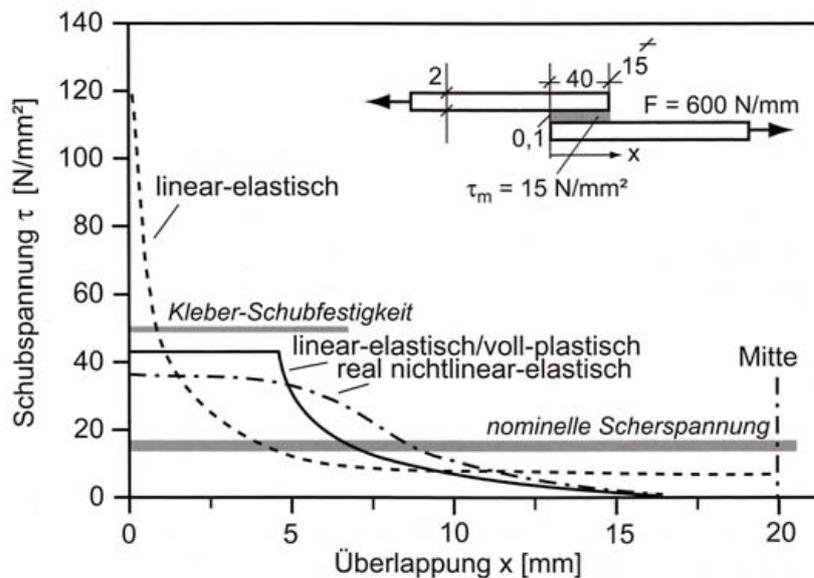
**Abb. 2.28:** exemplarische Spannungsverteilung in Überlappungsrichtung im Klebstoff einer symmetrischen Klebeverbindung [32]

Eigenstressungen in der Klebung entstehen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Klebstoff und Füge­teil und durch Klebstoffschwinden. Spannungen aus Schwindung sind von untergeordneter Bedeutung. Dagegen können bei unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten besonders bei großer Differenz zwischen Aushärtungs- und Betriebstemperatur hohe Eigenstressungswerte erreicht werden, die die Festigkeit erheblich beeinträchtigen. Die erzeugten Schubspannungen sind an den Überlappungsenden am größten und steigern sich mit wachsender Temperatur- und Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie zunehmender Überlappungslänge und höherem Schubmodul. Das Relaxationsvermögen der Klebstoffe bei langsamer Abkühlung nach einer Warmhärtung entschärft das Problem [46].

Wie alle Kunststoffe zeigt auch der Klebstoff ein nichtlinear-viskoelastisches Verformungsverhalten, das mit zunehmender Belastungszeit, -temperatur und -höhe ausgeprägter wird. Zur Beschreibung realer Spannungszustände sind Materialansätze zu wählen, die auf linear-elastisch/plastisches oder nichtlinear-viskoelastisches Verformungsverhalten zurückgreifen (Abb. 2.29). Leider stehen für die wenigsten Materialien diese Gesetze zur Verfügung, da das Messen an Schubproben unter allen beeinflussenden Randbedingungen (z.B. zeitabhängige Feuchtigkeitseinflüsse, Nachhärtungseffekte, strukturelle Unterschiede der dünnen Klebnähte) besonders schwierig ist. Am Beispiel einer Zugscherprobe aus verklebten Aluminiumblechen werden in Abb. 2.30 unterschiedliche Materialgesetze verglichen.



**Abb. 2.29:** Einfache Werkstoffmodelle zur rechnerischen Abbildung von Klebschichten



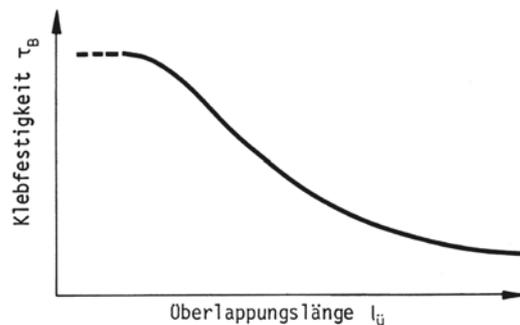
**Abb. 2.30:** Schubspannungsverteilung in einer einfachen überlappten EP-Verklebung von Aluminiumblechen unter biegemomentfreier Zugscherbeanspruchung [32]

Für kleine Klebstoffspannungen verhält sich die Schubspannungsverteilung annähernd proportional zur Gleitungsverteilung. Mit steigender mittlerer Spannung setzt das plastische Verhalten des Klebstoffes vom Rand der Überlappung her ein. Bei kurzen Überlappungslängen kann die ganze Klebefuge betroffen sein, während bei größeren Längen nur die Enden erfasst werden. Während sich die Dehnungsspitzen weiter erhöhen, nimmt das Anwachsen der Spannungsspitzen ab. Oft wird fälschlich vom Abbau von Spannungsspitzen gesprochen.

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Die Randspannung vermindert sich nicht und bleibt als Extremfall gleich. Es ändert sich nur der Gradient der Spannungsverteilung. Der Spannungsspitzenfaktor  $n = \tau_{max} / \tau_m$  wird durch die anwachsende mittlere Spannung geringer [41].

Größere Überlappungslängen führen durch hohe Spannungsspitzen bei geringeren Klebfestigkeiten zum Fließen des Klebstoffs, obgleich die absolute Kraft über der einer kurzüberlappten Verbindung liegt. Ein vollständiger Spannungsausgleich durch Fließen kann nicht erreicht werden, weil das Verformungsvermögen und die Bruchspannung lokal überschritten werden [41]. Der Zusammenhang von Überlappungslänge und Klebfestigkeit ist in Abb. 2.31 qualitativ dargestellt. Die Klebfestigkeit  $\tau_B$  ist die mittlere rechnerische Schubbruchspannung einer einschnittigen Klebegeometrie. Sie ergibt sich aus der Klebfläche und der maximalen Zugkraft  $\tau_B = A / F_B$ .



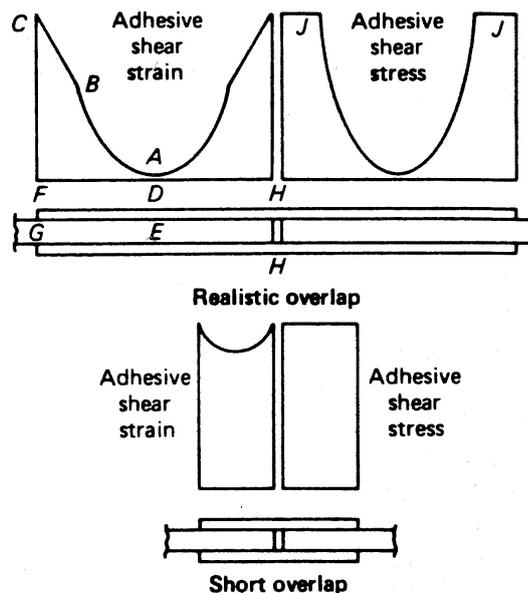
**Abb. 2.31:** Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Überlappungslänge [14]

Für den Klebstoff lässt sich feststellen, dass die Festigkeit einer Klebung eine Kombination von Bruchfestigkeit und Verformungsvermögen des Klebstoffes darstellt. Klebstoffe mit höherem Verformungsvermögen und dadurch eventuell verringerter Zugfestigkeit erreichen einen besseren Spannungsausgleich in der Klebschicht, wodurch die Zugscherfestigkeit relativ größer ist als bei Klebstoffen mit höherem E-Modul und höherer Zugfestigkeit [41]. Bei Kunststoffverklebungen mit hohen Belastungen sind Klebstoffe, die ein großes Verformungsvermögen ausbilden, den spröden und verformungsarmen Klebstoffen überlegen. Das Verformungsverhalten einer Klebschicht ist von wesentlich größerem Einfluss auf die Festigkeit einer Klebung als deren Eigenfestigkeit [14].

Für eine ausreichende Zeitstandsfestigkeit dürfen Klebstoff und Füge­teile nur im annähernd elastischen Bereich beansprucht werden. Bleiben die Dauerbelastungen unter 50 % der Zugscherfestigkeiten aus Kurzzeitbruchversuchen, ist eine ausreichende Lebensdauer zu erwarten. Die kritischen Verformungen unter Dauerlast können ein mehrfaches der statischen Bruchverformung betragen. Sie dürfen nicht überschritten werden, da das Versagen von

Klebeverbindungen durch ein Erschöpfen der Verformungsmöglichkeiten des Klebstoffes zustande kommt [41]. Die Aussage wurde für Verklebungen im Metallbereich formuliert und muss für die laminierten Faserverbundkunststoffe um ein Erschöpfen der interlaminaren Verformungsfähigkeit des duromeren Harzes ergänzt werden, das ebenso als Klebefuge zwischen Faserlagen angesehen werden kann.

HART-SMITH verfolgt in [48] den Ansatz mit möglichst langer Überlappungslänge zu kleben. Er verwendet etwa das 10-fache des Dicken-Längen-Verhältnisses von genormten Couponproben und nutzt hochfeste Dünnschichtklebstoffe mit ausgeprägtem plastischen Arbeitsvermögen und verbindet dünne Tragschichten aus Aluminium oder FVK. Grundsätzlich erreicht er ausreichendes Haftvermögen zwischen Klebstoff und Füge teil. Er erzielt Tragfähigkeiten der Verklebung, die über der Belastbarkeit der Tragwerksteile liegen. Allerdings kann eine einschnittige Verbindung nie die Tragfähigkeit der rein durch Membrankräfte beanspruchten Grundstruktur erreichen. Durch die unvermeidbare Exzentrizität in der einschnittigen Verbindung werden die Füge teile unmittelbar vor der Verklebungsstelle mit Normal- und Biegespannungen beansprucht. Die Tragfähigkeit dieser Füge teilstelle bestimmt er in einer linear-elastischen Berechnung. In einer zweiten Berechnung verwendet er für den Klebstoff einen bilinearen elastisch-plastischen Materialansatz. Für die zuvor ermittelte erforderliche Gesamtkraft kann die Spannungsverteilung hinreichend genau berechnet werden. Die Einhaltung der maximal zulässigen plastischen Dehnung im Klebstoff wird jeweils am Ende der Überlappung nachgewiesen.



**Abb. 2.32:** Spannungs- und Dehnungsverteilung in kurzen und langen zweischnittigen Überlappungen mit plastizierenden Klebstoffen [48]

## 2 Tragende Kunststoffe im Bauwesen

Durch die Überdimensionierung mit einer größeren Überlappungslänge als theoretisch erforderlich entstehen im Mittenbereich sehr moderate Klebstoffbeanspruchungen mit bis zu 10% der Maximalbeanspruchung. Dieser gering gedehnte Bereich der Verklebung ist vor allem ein wirksamer Schutz gegen Kriechen der gesamten Verklebung. Der zentrale Verklebungsbereich zeigt keine Kriechneigung und stabilisiert die Verbindung dauerhaft. Aus diesem Grund gibt es wesentliche Unterschiede im Verhalten von Couponproben und realen Strukturverklebungen. Couponproben reagieren extrem sensitiv auf Kriechversagen, weil ihnen der Mechanismus fehlt, die hoch beanspruchten Bereiche nach einer Entlastung wieder in den Ausgangszustand zurückzubringen. Diesen Unterschied verdeutlicht Abb. 2.32.

Die zu übertragende Last wird bei gleich steifen Fügepartnern jeweils hälftig von den Verklebungsbereichen nahe des Überlappungsendes getragen, unabhängig wie diese im Detail ausgebildet sind. Je nach Endausbildung (z.B. mit Schäftung) können die Randdehnungen unterschiedlich sein. Die Verformungsenergie im Klebstoff ist für beide Überlappungsenden gleich.

Um den Schälereffekt (Abb. 2.35) wirkungsvoll zu entschärfen, schlägt HART-SMITH vor, die Fügepartnern flexibel zu gestalten. Von außen ist eine leichte Schäftung im Verhältnis 1:10 auf 0,25 bis 0,75 mm Fügepartnerrestdicke denkbar und auf der Verklebungsseite ein leichter Materialabtrag, der auf den letzten Millimetern ( $\leq 5$  mm) der Klebefuge eine Schichtstärke vom 2,5 bis 5-fachen der normalen Klebschichtstärke (0,1 mm) zulässt (Abb. 2.33). Außerdem ist das Ende der Klebung mit einer Klebstoffkehle zu versehen. Die Effizienz der Verklebung lässt sich mit einem ausbalancierten Steifigkeits- und Festigkeitsverhältnis der Fügepartner untereinander erhöhen (Abb. 2.34). Die Überlappungslänge wird mit den Klebstoffeigenschaften bei der höchsten Gebrauchstemperatur bestimmt. Während in dem Fall der Klebstoff am weichsten ist, wird die Grenzbeanspruchbarkeit der Verklebung unter den Eigenschaften des härteren Klebstoffes bei niedrigster Gebrauchstemperatur bestimmt.

Die Grenzfestigkeit einer lang überlappten Verklebung wird von der Schubverformungsenergie der Klebstoffschicht bestimmt. Die Schubverformungsenergie entspricht der Fläche unter der Schubspannungs-Dehnungskurve eines Klebstoffes. Für unterschiedliche Temperaturen wird der gleiche Klebstoff andere Kurvenverläufe abbilden, die dennoch immer dieselbe Fläche einschließen. Somit reagiert die Festigkeit einer realistisch ausgelegten Klebeverbindung wenig sensitiv auf wechselnde Umgebungstemperaturen, zumindest so lange die Glasübergangstemperatur des Klebstoffs nicht erreicht wird [48].

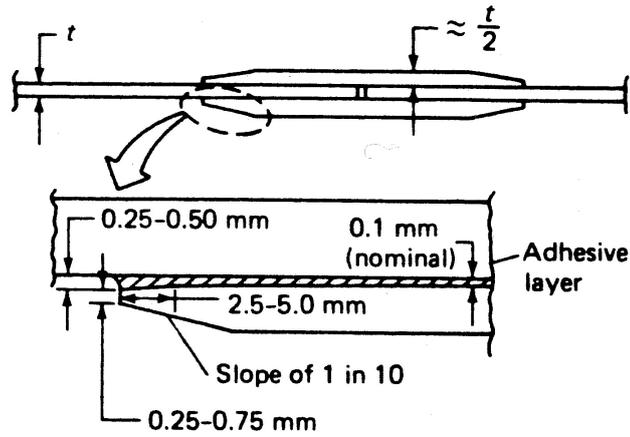


Abb. 2.33: Fügegliedausbildung zur Reduzierung der Schälspannungen im Klebstoff [48]

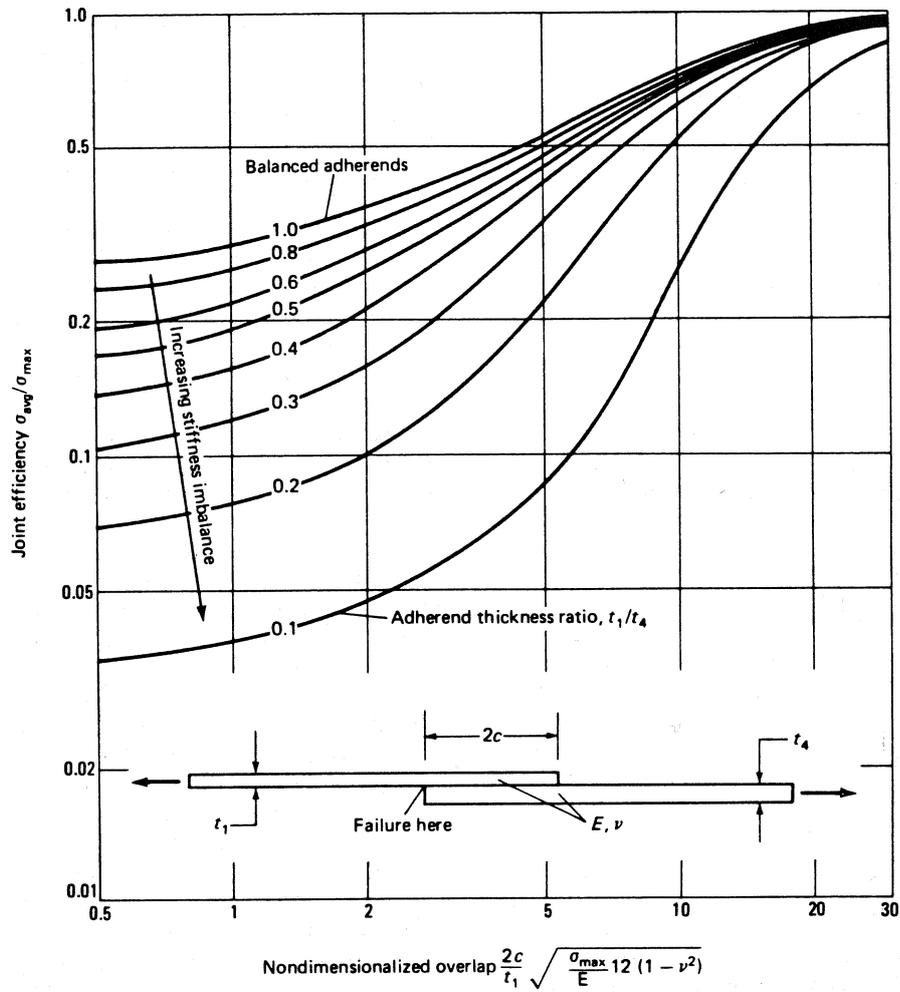
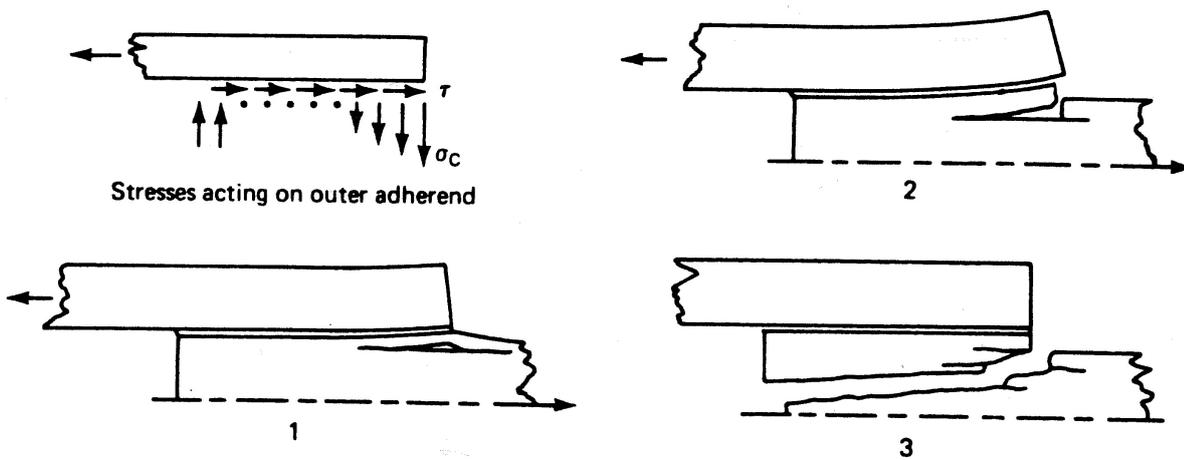


Abb. 2.34: Die verringerte Effizienz von unausgeglichener Steifigkeit zwischen den Fügegliedern bei einschrittig überlappten Klebungen [48]

### 2.9.5 Versagensformen

Das Versagen von Klebverbindungen geht von den mit Spannungsspitzen beanspruchten Überlappungsrändern aus [32]. Beim Kohäsionsbruch einer Verbindung ist das Verformungsvermögen der Klebschicht weitgehend erschöpft [41]. Diese Versagensform ist für Metallklebungen typisch. Kunststoff-Metallklebungen und reine Kunststoffklebungen versagen im Allgemeinen durch Fügeteilbrüche am Ende der Überlappung [14].



**Abb. 2.35:** Verlauf des Schälspannungsversagens dicker Laminate [48]

Für die Faserverbundkunststoffe kommt das interlaminare Versagen als wichtige Versagensform hinzu, weil sich die mechanischen Eigenschaften senkrecht bzw. zwischen den Faserlagen um eine Größenordnung von denen in Faserrichtung unterscheiden (Abb. 2.35).

Die möglichen Versagensformen einer Klebverbindung sind:

- Schubversagen der Klebschicht,
- interlaminares Schubversagen des Fügeteils,
- Längszugversagen des Fügeteils und
- Querkzugversagen des Fügeteils (Abb. 2.35).

Die DIN EN ISO 10365 [49] klassifiziert die möglichen Bruchbilder einer Klebeverbindung und vergibt Abkürzungen für die unterschiedlichen Bruchereignisse (Abb. 2.36).

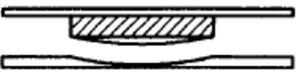
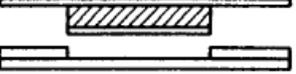
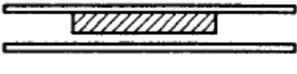
	Bruchbilder	Bezeichnung
Fügeteilwerkstoff	 <p>Bruch eines oder beider Fügeteile (Fügeteilbruch)</p>	SF
	 <p>Bruch eines Fügeteils (kohäsives Fügeteilversagen)</p>	CSF
	 <p>Bruch durch Delaminieren (Delaminierbruch)</p>	DF
Klebstoff	<p>Arten des Kohäsionsbruches</p>  <p>Kohäsionsbruch</p>	CF
	 <p>Substratnaher spezieller Kohäsionsbruch</p>	SCF
	 <p>Adhäsionsbruch</p>	AF
	 <p>Adhäsions- und Kohäsionsbruch mit Schälung</p>	ACFP

Abb. 2.36: Bruchbildbezeichnungen von Klebungen nach DIN EN ISO 10365 [49]

## **3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlschlussbleche**

### **3.1 Problemdarstellung**

Ein prädestiniertes Anwendungsfeld für Faserverbundkonstruktionen in der Architektur sind frei geformte flächige Tragwerke. Mit faserverstärkten Kunststoffen kombiniert man die Vorzüge der freien Formbarkeit mit günstigen Festigkeitseigenschaften. Für Gebäudehüllkonstruktionen kommen bei flächigem Einsatz die Dichtigkeit und Medienresistenz zusätzlich zum Tragen. Flächig und raumbildend lassen sich leichte Konstruktionen verwirklichen. Dabei unterstützt die Formsteifigkeit die geringe lokale Biegesteifigkeit, die in den dünnen Wandstärken und in der begrenzten Materialsteifigkeit begründet liegt. Flächigen Strukturen aus FVK sind gezwungenermaßen in einzelne Teile gegliedert. Für das Fügen der Teilflächen sind Verbindungen erforderlich. Materialgerecht fügt man FVK auf die gleiche Art, wie man auch den Werkstoff aufbaut - durch Verkleben. Zwei Nachteile sind dabei zu erkennen. Die Klebung eignet sich nicht oder nur mit sehr montageunfreundlichem Aufwand für den Baustelleneinsatz. Noch entscheidender ist, dass die stoffschlüssige Verbindung nicht zerstörungsfrei lösbar ist.

Sind als Anforderungen Montagefreundlichkeit und Demontierbarkeit zu erfüllen, wird üblicherweise zu einer Bolzenverbindung gegriffen. Zur Anwendung kommen Scherlochleibungsverbindungen durch Überlappung (siehe z.B. Fly's Eye von Fuller [22]) oder zusätzliche Laschen bzw. ein Verschrauben von Flanschen benachbarter Bauteilkanten (D-Toren [50], Abb. 2.8). Eine Vielzahl von Bauten mit diesem Verbindungsprinzip wurden von GENZEL und VOIGT zusammengetragen [22, 20]. Je nach Vorspannungsgrad der Schrauben werden die Lochleibungen der unvermeidlichen Bohrungen mehr oder weniger stark beansprucht.

Grenzt man die zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren auf diejenigen ein, die individuelle und dem Baumaßstab genügende Lösungen ermöglichen, kommen die handwerklichen und weniger die industriellen Großserienverfahren in Betracht. Mit diesen meist manuellen Verfahren lassen sich komplexe Kantengeometrien gar nicht oder nur mit unzureichender Präzision erzeugen. Übliche Randausbildungen sind demzufolge meist einfache ebene Flansche, die nach innen oder außen gerichtet sind.

### *3.2 Die Technologie einer lösbaren materialgerechten Verbindung*

Über den Kontakt der Flansche, meist unter Verwendung eines elastomeren Dichtungstreifens, werden die Bauteile bei einer Schraubenverbindung zusammengespannt. Der Nachteil dabei liegt zum einen im unvermeidbaren Durchbruch durch das Laminat und zum anderen im ungünstigen Lastangriff senkrecht zur Flanschfläche. Die geringe Steifigkeit in Lastrichtung, also für den Flansch in Plattenrichtung, erfordert einen engen Verbindungsabstand der einzelnen Schrauben, um ein Öffnen der Fugen zu verhindern. Der Montageaufwand ist entsprechend hoch.

Günstig ist es, die Kräfte der Verbindung in steifer Scheibenrichtung in die Fläche der Struktur einzuleiten. Die Beanspruchung könnte materialgerecht, also faserparallel erfolgen. Die hohe Scheibensteifigkeit würde eine geringe Fugenverformung und somit große Verbindungsabstände zulassen.

Es werden Verbindungslösungen untersucht, die eine Fügung der Kanten flächiger FVK-Strukturen ohne Schrauben ermöglichen. Die erste Idee basiert auf einem rein axialem Verspannen benachbarter Bauteilkanten. Diese Verbindung stellt im nicht vorgespannten Zustand ein Gelenk dar, das in Kombination mit der Geometrie der Bauteile, also gekrümmten Fugenverläufen, zu einer standsicheren Gesamtkonstruktion führt. Die zweite Idee basiert auf einem starren formschlüssigen Verbund der Bauteilkanten, der auf die Steifigkeit der Fugegeometrie nicht angewiesen ist. Für beide Verbindungsideen kommen verklebte Edelstahlbleche mit aufgeschweißten Anschlussteilen zur Krafteinleitung zum Einsatz.

### **3.2 Die Technologie einer lösbaren materialgerechten Verbindung**

Die Technologie geht von einem nachträglichen Aufkleben der Verbindungsanschlüsse auf das FVK-Bauteil aus. Auf diese Weise lässt sich beim Handlaminat die Einbaugenauigkeit verbessern. Das Aushärtungsschwinden des gesamten Bauteils kann zunächst abklingen und als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Je nach Herstellungsverfahren kommt auch ein Einbau der Bleche während des Laminiervorgangs der FVK-Bauteile in Betracht [16]. Die Oberflächenvorbereitung des Laminates entfällt in diesem Fall. In beiden Fällen erreicht man optimale Materialeigenschaften mit einer nachgelagerten Wärmebehandlung (Temperung).

Die Fügung über die vorgeschlagenen aufgeklebten Stahlbleche können als Verbindung und nach [36] auch als Lasteinleitung angesehen werden, da sie eine besondere konstruktive Maßnahme zur Kraftüberleitung darstellen.

### 3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche

Die Verbindungspunkte werden diskret entlang der zu fügenden Bauteilkante angeordnet. Mittels eines mechanischen Verschlusses, der an den Lasteinleitungsblechen angreift, werden die Bauteilränder gegeneinander gespannt. Die Kontaktflächen zwischen benachbarten FVK-Konstruktionsteilen bauen über ein Fugenband den nötigen Reibverbund auf oder werden zusätzlich mit einer Verzahnung versehen, die einen Formschluss gegen eine Verschiebung parallel zur Kontaktfläche sicherstellt.

Als diskontinuierliche Verbindung zwischen den gegenüberliegenden Anschlussblechen zweier Bauteile kann ein Spannhakenverschluss zum Einsatz kommen. Zur Verwendung dieses Verschlusstyps muss ein Blech mit angeschweißtem Anschlussbolzen zum Aufschrauben des Spannverschlusses und das andere mit einer zusätzlichen Öse zum Einhängen des Spannarms (Abb. 3.1, 3.8) versehen werden. Der Spannhakenverschluss hat verschiedene Vorteile:

- Die Kraft wird materialgerecht, also faserparallel, in die tragende Fläche eingeleitet.
- Durch den Lastangriff in steifer Scheibenrichtung kann entgegen dem Lastangriff in Plattenrichtung an biegeweichen Randaufkantungen mit großen Verbindungsabständen gearbeitet werden.
- Das teilweise erhebliche Aushärtungsschwinden der Bauteile kann durch nachträglichen Verbindungseinbau kompensiert und die Passgenauigkeit verbessert werden.
- Spannverschlüsse sind wenig empfindlich für Einbautoleranzen, da die Armlänge nachstellbar ist.
- Die Verbindung lässt sich schnell schließen und wieder öffnen, wobei der Hakenverschluss eine Möglichkeit der Verriegelung aufweist, um ein unbeabsichtigtes bzw. unautorisiertes Öffnen zu verhindern.
- Weder beim Fügen noch beim Nachstellen der Hakenlänge ist der Einsatz von Werkzeugen erforderlich.
- Sämtliche Verbindungsteile befinden sich auf der Innenseite der Traghülle. Die glatte Außenansicht bleibt erhalten.
- Über die Dimensionierung der verklebten Bleche und die Auswahl des Hakenverschlusses kann als schwächster Punkt der Verbindungsstruktur der Haken bestimmt werden, der im Fall einer Überlastung plastisch nachgibt und sich einfach ersetzen lässt.
- Viele Varianten von Spannarmverschlüssen werden industriell angeboten.

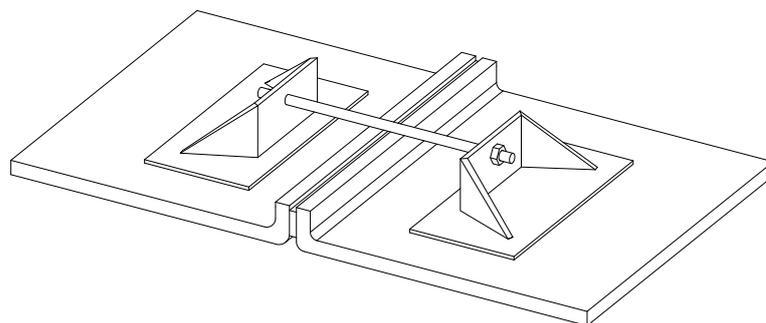
### 3.2 Die Technologie einer lösbaren materialgerechten Verbindung



**Abb. 3.1:** Spannverschluss mit beiden Lastanschlussblechen

Eine Abwandlung der Spannhakenverbindung stellt die Verbindung über eine Zugstange zwischen gegenüberliegenden Lastblechen dar (Abb. 3.2). Als Unterschiede zum Spannverschluss lassen sich anführen:

- Die Zugstange ist gegenüber dem Spannhaken wesentlich preiswerter.
- Zum Schließen der Verbindung wird einfaches Werkzeug benötigt.
- Ein unbeabsichtigtes bzw. unautorisiertes Öffnen wird unterbunden.
- Ein Nachspannen der Verbindung kann im Gegensatz zum Spannverschluss ohne Öffnen des Verschlusses erfolgen (z.B. mit Drehmomentenschlüssel).
- Im Fall von sehr hohen Randstegen kann die Zugstange durch die Stege geführt werden, was eine Bohrung erfordert. Die Kraft wird aber weiterhin materialgerecht und verformungsarm in die FVK-Schalenstruktur eingeleitet.
- Mit oder ohne Bohrung durch die Randaufkantung baut diese Lösung am geringsten in der Höhe auf.



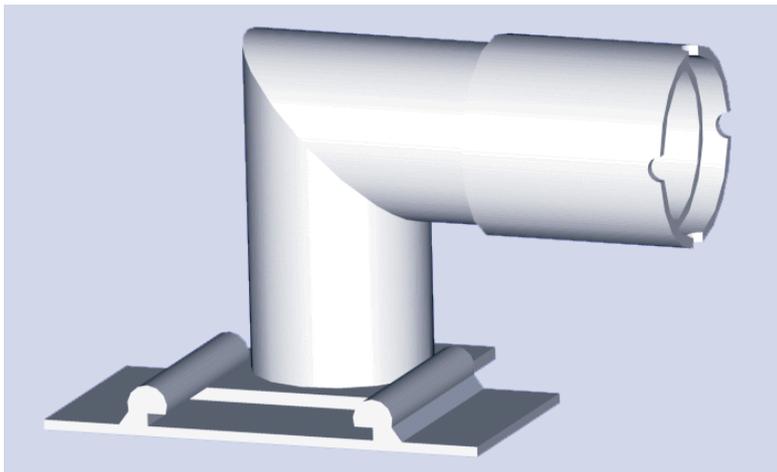
**Abb. 3.2:** Entwurf einer Zugstangenverbindung

Eine zweite Ausführungsvariante einer Bauteilverbindung ist über die Verwendung eines biegesteifen Stahlbügels möglich. Dieser verbindet Einzelteile, indem er seitlich mit Fußblechen in aufgeschweißte Schienen der Lastbleche geschoben wird. Der Bügel besteht aus drei Teilen. Zwei Rohrwinkel mit Fußplatte und entgegengesetztem Außengewinde

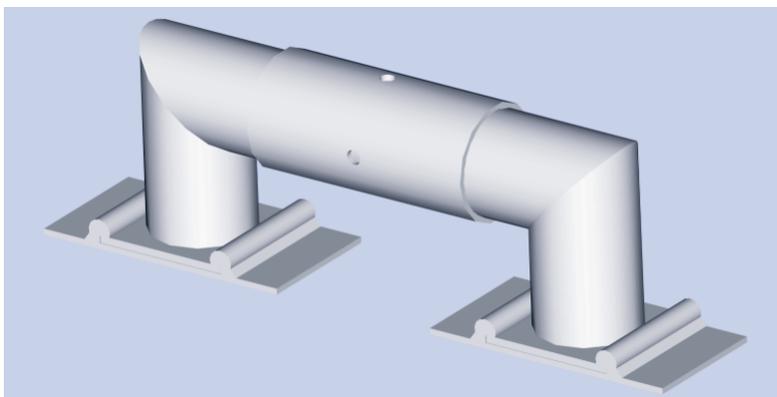
### 3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche

werden über eine Schraubhülse mit entgegengesetztem Innengewinde verstellbar, aber kraftschlüssig verbunden (Abb. 3.3, 3.4). Folgende Vorteile lassen sich für das Fußblech mit Schienen formulieren:

- Die Kraft wird materialgerecht, also faserparallel, in die tragende Fläche eingeleitet.
- Die Anschlussexzentrizität ist wegen der geringen Bauhöhe der Schienen auf dem Blech so gering wie möglich.
- Über das Fußblech in den Führungsschienen lassen sich Anschlussmomente als Kräftepaare übertragen.
- Die Lastübertragung über den Bügel entlastet die Fuge zwischen den GFK-Teilen.
- Der verstellbare Bügel kann Einbautoleranzen ausgleichen.



**Abb. 3.3:** symmetrische Hälfte eines justierbaren Verschlussbügels mit Lastblech



**Abb. 3.4:** justierbarer Verschlussbügel und Lastbleche mit Schienen

Die zu erwartenden Kantenzugkräfte werden abschnittsweise von den Verschlüssen übernommen. Druckkräfte entlang der Bauteilkanten werden direkt durch Kontakt übertragen. Querkräfte werden in den Fugen über Kraft- und Formschluss weiter geleitet (Kap. 3.3).

Da sich praktikable Kombinationen von Lastblechgröße und Verschluss ergeben, lassen sich aus den Kantenkräften  $F_{FVK}$  und der einzelnen Verschluss­tragfähigkeit  $V$  die Anzahl der diskreten Verbindungspunkte bzw. deren Abstand  $a$  errechnen.

$$a = \frac{F_{FVK}}{V} \quad (3.1)$$

Als grundsätzlicher Dimensionierungsvorschlag soll der Verschluss so gewählt werden, dass die Beanspruchbarkeit der Klebeverbindung die Tragfähigkeit des Verschlusses übertrifft und im Fall einer Überbeanspruchung der einfach austauschbare Verschluss ersetzt werden kann, ohne Schäden an der Konstruktion zu erzeugen.

Für den Fall, dass eine GFK-Hüllkonstruktion an ein Primärtragwerk angeschlossen werden soll, trägt die Verbindung das geringe Eigengewicht der Faserverbundbauteile und die lokalen Wind- und Schneelasten ab. Die Verbindung erfüllt vor allem Funktionen der Lagesicherung und des Toleranzausgleiches. Ein frei geformtes mobiles und modularisiertes Gebäude mit einer montierten GFK-Sekundärtragstruktur wird in Kap. 3.4.2 vorgestellt.

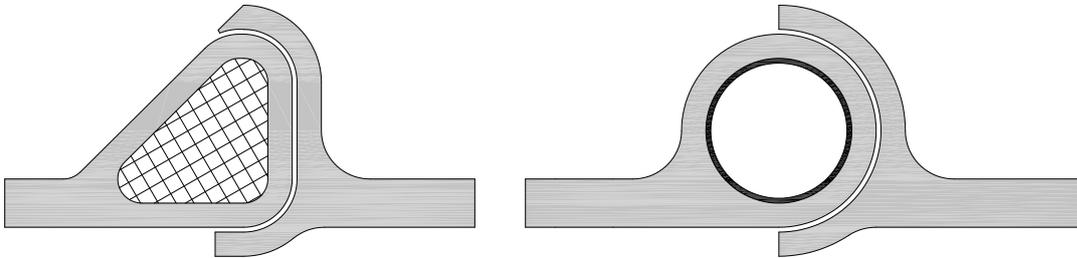
### 3.3 Fugenausbildung für Kraft- und Formschluss

Den Fugen zwischen den Tragwerksmodulen kommen verschiedene Aufgaben zu. Sie bilden die kraftübertragende Kontaktfläche, sorgen für Dichtigkeit und gleichen die Toleranzen aus der Bauteilproduktion aus. Mit der vorgeschlagenen Spannverbindung muss ein Kraftschluss hergestellt werden. Mit dem Kraftschluss soll ein gegenseitiges Verschieben der Module parallel zur Fuge verhindert werden. Der Kraftschluss wird durch ein elastomeres Fugenband und die Kraft aus der Spannverbindung realisiert. Denkbar ist eine Kombination eines Fugenbandes mit einer besandeten FVK-Oberfläche, die den Reibbeiwert und den kohäsiven Anteil am aktivierbaren Schubkraftwiderstand zwischen Fugenband und FVK erhöht.

Je nach Kantengeometrie und Belastungssituation kann die Ausbildung einer Verzahnung nötig werden. Die Verzahnung kann in Form von metallischen Dornen und Hülsen (Abb. 3.8) in den Randaufkantungen realisiert werden. Besser ist eine Unterstützung der kraftschlüssigen Verbindung mit einem Formschluss über die Ausbildung einer Randprofilierung, die entsprechend der Abb. 3.5 ausgebildet werden kann. Ein innovatives Beispiel einer kraftschlüssigen Verbindung mit Formschluss wurde bei dem segmentierten FVK-Brücksteg über die

### 3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche

Kempt in Winterthur 2001 bzw. der Brücke zur Wolke der Schweizer EXPO.02 von KURATH verwirklicht. In beiden Fällen wurden die modularisierten Trägersegmente „Variocell 02“ verwendet [39, 51].



**Abb. 3.5:** Entwürfe zur formschlüssigen Randausbildung

Auf die Ausbildung der formschlüssigen Fuge soll im Weiteren nicht eingegangen werden. Ebenso wird auf die Vielzahl der möglichen Spann- und Bügelverschlüsse nicht eingegangen. Sie werden von Beschlagherstellern in einer breiten Vielfalt angeboten. Der Fokus der Arbeit ist auf die Klebeverbindung zwischen GFK-Bauteil und lokal begrenztem Stahlblech gerichtet.

## 3.4 Referenzen für die Verbindungslösung

### 3.4.1 Experimentalbau MYKO



**Abb. 3.6:** links: MYKO 2005 in Münster beim SFT-Congress, rechts: MYKO 2004 an der Bauhaus-Universität Weimar

In der „Forschungsgruppe materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren mit faserverstärkten Kunststoffen“ (FOMEKK) an der Bauhaus-Universität Weimar wurde 2004 die modulare



**Abb. 3.7:** links: MYKO Türdetail beim Belastungsversuch mit Mannlast, rechts: Verbindungsdetail an einer Hauptschale des MYKO



**Abb. 3.8:** verklebte Stahlteile der Spannverbindung des MYKO vor dem Sandstrahlen

GFK-Raumstruktur „MYKO“ als Kino für 10 Personen entwickelt und realisiert. Ähnlich einer Mykorrhiza, dem Wuzelgeflecht von Pilzen und höheren Pflanzen, teilt sich der MYKO die Infrastruktur mit seiner Umgebung. Das spart Kosten und Gewicht und ermöglicht einen Aufbau an verschiedensten Orten.

Die rotationssymmetrische Hülle ist dabei Tragwerk und Möbel in einem. Der MYKO misst 4,80 m in der Länge und 3,0 m im Durchmesser. Er besteht aus dem Hauptbaukörper und einer halbkugelförmigen Tür, die sich um eine vertikale Drehachse bewegen lässt (Abb. 3.6). Die FVK-Struktur wurde in  $2 \times 4$  gleiche Bauteile unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie gegliedert. Eine Entwurfsrandbedingung war u. a. die maximale Transportbreite, sodass die beiden Teilestapel auf einem LKW transportiert werden konnten. Der MYKO ist mit Polstern ausgekleidet und kann auf dem mobilen Sandsackfundament mit verschiedenen Längsneigungen aufgestellt werden.

Die GFK-Struktur besteht aus einem 13 mm Sandwich mit  $2 \times 2,2$  mm Deckschichten aus

### 3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche

ungesättigtem Polyester mit Gewebeerstärkung in quasi-isotroper symmetrischer Schichtung. Der 9 mm Sandwichkern besteht aus zwei Lagen harzgetränktem synthetischen Vlies. Die äußeren Gewebelagen sind mit pigmentiertem Harz handlaminiert, um mögliche Kratzer aus Nutzung und Transport nicht sichtbar werden zu lassen. Die Bauteile erhielten umlaufend Randaufkantungen aus massiven GFK, die das Fugenband aufnehmen, als Druckkontaktfläche dienen und die Ränder aussteifen.

Die Einzelmodule werden über fünf punktuelle gelenkige Verbindungen je Fügekante direkt gegeneinander verspannt. Der Lasteintrag erfolgt in die Schalenflächen, die eine hohe MembranstEIFigkeit aufweisen. Durch die gekrümmten Bauteilkanten entstehen biegesteife Verbindungen zwischen den Modulen. Die Verbindung ist baustellentauglich und montagefreundlich. Sie ist nachstellbar und werkzeugfrei zu öffnen und zu schließen und wird dem temporären Charakter des Gebäudes und der faserverstärkten Tragstruktur gerecht.

Der Krafteintrag erfolgt über aufgeklebte Lasteinleitungsbleche  $60 \times 100 \times 2$  mm aus Edelstahl (1.4301) in Längsausrichtung (Abb. 3.7 u. 3.8). Die Bleche wurden sandgestrahlt, mit Aceton gereinigt und mit gefülltem Polyesterlaminierharz verklebt. Der Anschlusswinkel zwischen den GFK-Modulen wurde in der Verbindung durch eingepasste und gevoutete Multiplexplattenstücke auf eine gerade Ausrichtung verändert (Abb. 3.7). Die Verbindungspunkte wurden mit 1,5 mm GFK überlaminiert und getempert. Auf die Bleche sind zur Aufnahme eines Spannarmverschlusses einmal  $2 \times$  M8-Gewindebolzen und zum andern ein Bügel mit 10 mm Durchmesser aufgeschweißt, an dem der Spannhaken angreift.

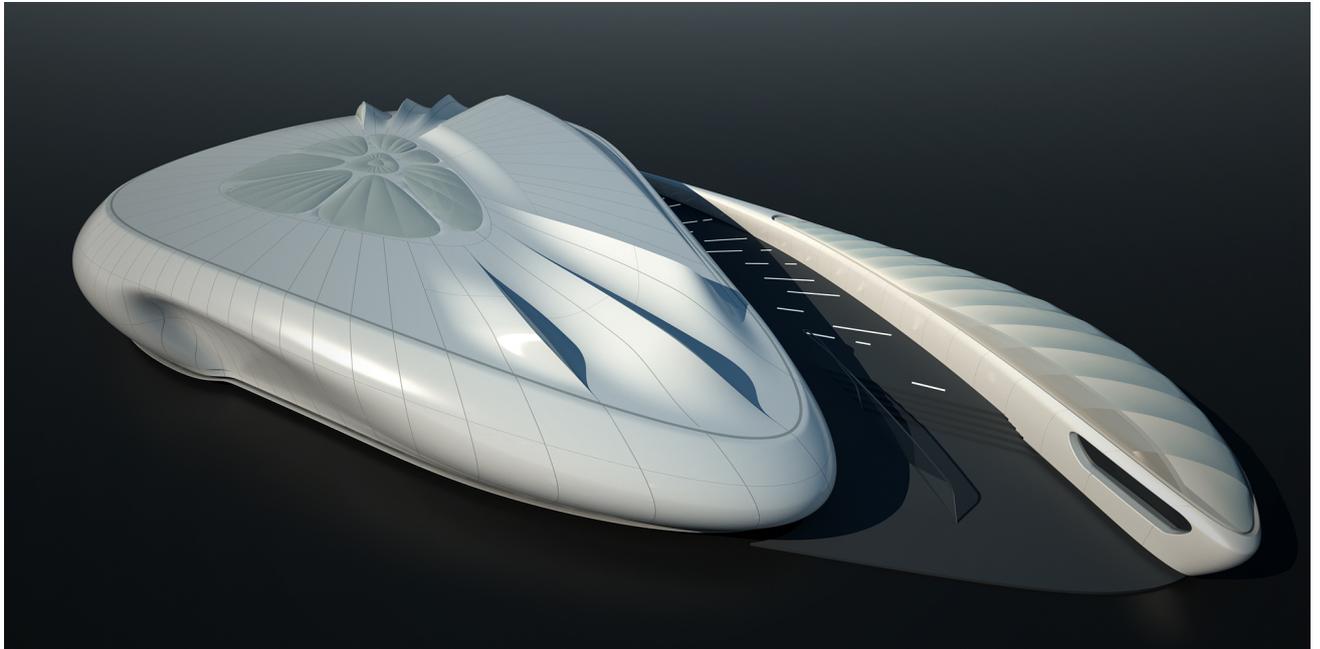
Der Verschluss hat eine zulässige Tragkraft von  $F_{zul} = 4,45$  kN, während die Verklebungsstellen eine mittlere Bruchkraft von 15 kN aufweisen (Kap. 4.2). Im Fall einer Überlastung würde nicht die Klebeverbindung geschädigt, sondern der leicht austauschbare Spannarm des Verschlusses aufgebogen.

Die Lagesicherung in der Kontaktfuge zwischen den Bauteilen übernimmt zum einen die durch Vorspannung aktivierte Reibung am eingelegten Fugenband, zum anderen ist an jedem Verbindungspunkt ein Passstift und eine Kragenhülse in die Randaufkantung eingesetzt, die eine Verschiebung der Bauteile gegeneinander ausschließen (Abb. 3.8).

Der MYKO wurde viermal an unterschiedlichen Standorten aufgebaut, zuletzt 2005 im Rostocker Zoo, wo er als Kino für ein WWF-Projekt intensiv genutzt wurde.

Zu weiteren Details zum Projekt MYKO sei auf [52, 53, 54, 55, 56, 57, 58] verwiesen.

3.4.2 Chanel - Exhibition Pavillon



**Abb. 3.9:** Außenansicht des Chanel Mobil Art Pavillon 08, Quelle: BORSTELMANN, ZAHA HADID ARCHITECTS, London

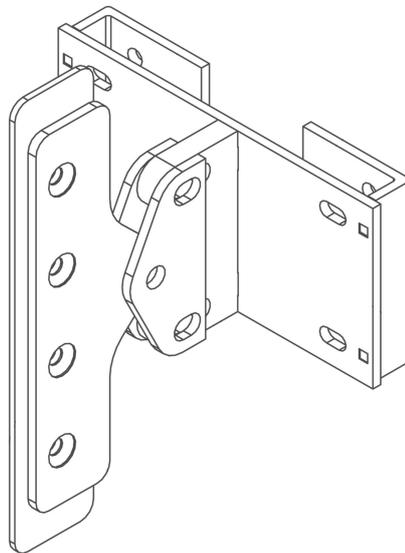


**Abb. 3.10:** links: GFK-Module mit geklebten und schraubengesicherten Verbindungsblechen auf Paletten für Containertransport, rechts: Verbindung der GFK-Module mit der Primärtragstruktur, Quelle: BORSTELMANN, ZAHA HADID ARCHITECTS, London

### 3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche

Für Chanel wurde der „Mobil Art Pavillon 08“, ein mobiler Ausstellungspavillon, von ZAHA HADID ARCHITECTS entwickelt. Er besteht aus frei geformten GFK-Hüllkonstruktionspanelen auf einer primären Stahltragstruktur (Abb. 3.9). Die Tragwerksplanung oblag DAVID KENDALL von Optima Projects. Die Realisierung der Faserverbundstrukturen gelang EDWIN STOKES bei Stage One Creative Services Ltd, Yorkshire Nordengland.

Die Sandwichkonstruktion (12 mm) aus 3,5 mm Deckschichten und 5 mm Kernmaterial wurde mit einem flammenhemmenden Polyesterharz hergestellt. Die GFK-Module besitzen zur Aussteifung umlaufend Randaufkantungen mit 100 mm Höhe.



**Abb. 3.11:** Verbindungsdetail mit zu verklebenden Lastanschlussblechen und justierbarer Klemmkonstruktion des Chanel Mobil Art Pavillon 08, Quelle: BORSTELMANN, ZAHA HADID ARCHITECTS, London

Die Ausmaße der 400 unikatigen Einzelmodule sind auf die Abmessungen von Frachtcontainern begrenzt (Abb. 3.10). Geschraubte Stahlträgerspannen formen die Primärkonstruktion, auf der die GFK-Hülle als Sekundärtragwerk mit punktuellen Haltern in den Eckpunkten befestigt wird.

Die Verbindung besteht aus einer angeklebten Stahlplatte, die über einen Bolzen gelenkig mit einem verstellbaren Klemmhalter verbunden ist (Abb. 3.10, 3.11). Die geklebte rechteckige Stahlplatte ist mit kurzer Klebelänge und langer Klebebreite mit dem Rand der umlaufenden Aufkantung mit einem Polyesterklebstoff verbunden. Über vier Schrauben wurde jede Klebeverbindung gesichert und für den Aushärteprozess fixiert (Abb. 3.9). Die Schrauben sind am Ende des Bleches eingebracht und reduzieren die Schälbeanspruchungen in der Klebefuge. Eine elastomere Fugenfüllung zwischen den Modulen dichtet die Außenhülle. Sie übernimmt aber keine statische Funktion.

### 3.5 Kleben von Stahl und FVK

„Wegen des komplexen und allgemein hohen Spannungszustandes im Bereich der Krafterleitung werden bei Hochleistungsverbundwerkstoffen für Krafterleitungs- oder Verbindungselemente häufig metallische Anschlussstücke verwendet. Diese können bereits während der Verarbeitung mit eingebracht oder nachträglich, meist über Bolzen-, Niet- oder Klebeverbindungen, angebracht werden.“ [32]

HABENICHT empfiehlt für hochbeanspruchte Kunststoff-Metallklebungen in [14] die Verwendung von u. a. kalthärtenden 2K-Epoxidharzklebstoffen bei kleinflächigen Klebungen mit begrenzter Wärmebelastung, außerdem 2K-Polyurethan- und Methacrylatklebstoffe.

Bei großflächigen Verklebungen von Stahl und GFK muss besonders auf Zwangsspannungen aus unterschiedlichem Temperaturdehnungsverhalten geachtet werden. Der Klebstoff muss deshalb ein hohes Verformungsvermögen aufweisen. Unter Einhaltung hoher definierter Schichtstärken ermöglicht ein Polyurethanklebstoff wie z. B. der Sikabond-T14 einen Abbau von Spannungsspitzen durch sein hohes Dehnungs- und Gleitungsvermögen. Auch unter dynamischer Beanspruchung lassen Klebungen mit hohem Verformungsvermögen eine längere Lebensdauer erwarten. Beim Auftrag von feuchtigkeitshärtenden Polyurethanklebstoffen ist bei großflächigen Fügungen auf eine sichere Luftzufuhr für die Aushärtung zu achten (Zahnspachtel oder Raupen) oder stattdessen ein 2K-Polyurethanklebstoff zu verwenden, der von der Luftfeuchtigkeit unabhängig härtet. GROSSKURTH verwendet u. a. in [38] einen solchen 2K-Polyurethanklebstoff, der mit einer Zugfestigkeit von 5 MPa bei 400% Bruchdehnung und schneller Aushärtung dem Sikabond-T14 (1K-PUR) überlegen ist. Sollte eine zähelastische Verklebung einmal erneuert werden müssen bzw. versagen, bleibt das Füge teil unbeschädigt, da die Klebstoffe ein klares kohäsives Versagen zeigen.

#### 3.5.1 Oberflächenvorbereitung von Stahlblechen

Alle Metalle sind nach entsprechender Vorbehandlung klebbar, wobei die Haftung zwischen Klebstoff und Metall ausreichend ist und die Kohäsion des Klebstoffes die Schwachstelle darstellt [41]. Nach MONIATIS [46] wird als geeignetes Verfahren für die Oberflächenvorbereitung von Stahlblechen eine Kombination aus Entfetten, Korundstrahlen und erneutem Entfetten vorgeschlagen. Das Entfetten findet im siedenden 1,1,1-Trichlorethanbad unter Einwirkung von Ultraschall und einem Reinigen in der Dampfphase des Lösungsmittels statt. Zum Sandstrahlen wird Korund von 0,2 - 0,5 mm verwendet.

### 3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche

Diese beschriebene industrielle Reinigungsmethode lässt sich möglicherweise nicht in jeder Laminierwerkstatt umsetzen. Eine handwerklich praktikable Oberflächenvorbereitung für Stahlteile besteht aus Entfetten mit Aceton, vorsichtigem Sandstrahlen oder Anschleifen mit Schleifvlies oder einem mittlerem Sandpapier sowie ein erneutes Entfetten mit Aceton. Die Klebung sollte sofort erfolgen. Mit diesen unkomplizierten Oberflächenvorbehandlungen konnten in Kurzzeitbruchversuchen positive Erfahrungen gesammelt werden (Kap. 4.3).

Nach ULMER [41] steigert sich die Klebfestigkeit von den mechanischen zu den chemischen Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung. Definiert man die Güte der Aktivierung der Stahloberfläche von null bis eins ergibt sich für eine Pickling-Beize 1,0, für Anschleifen 0,8, für Stahlbürsten 0,7, für anodische Oxidation 0,6 und für reines Entfetten der Wert 0,1.

Da die Oberflächenspannung von Wasser höher ist als die der Klebstoffe, ist eine Benetzung mit Wasser schwieriger. Gelingt die Spreitung von Wasser auf der zu klebenden Fläche, erfolgt auch eine gute Benetzung durch den Klebstoff [14]. Auf diese Weise kann sehr einfach der Entfettungsgrad von metallischen Oberflächen geprüft werden.

Mit dem Sandstrahl-Coating (SACO-Verfahren der DELO-Industriechemikalien GmbH & Co. KG) lässt sich das Adhäsionsverhalten insbesondere unter Wärme und Feuchtebeanspruchung, entscheidend verbessern. Das Verfahren nutzt chemisch modifiziertes Strahlgut, das neben dem Oberflächenabtrag für eine Oberflächenbeschichtung durch Silanisieren sorgt [14].

#### 3.5.2 Tragverhalten von Metall-Kunststoff-Verklebungen

In Verbindungen mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln der Füge­teile ist die Beanspruchung der Klebschicht nicht nur inhomogen, sondern auch unsymmetrisch. Durch die Dehnungsbehinderung des niedermoduligen durch den höhermoduligen Werkstoff findet eine Konzentration der Beanspruchung am Ende des Füge­teils mit dem höheren Elastizitätsmodul statt [46, 14]. Die Dehnungsbehinderung findet auch in Querrichtung statt. Es kommt bei ausreichender Klebefläche häufig zum Füge­teilbruch im Kunststoffteil im unmittelbaren Anschluss an den Überlappungsbereich.

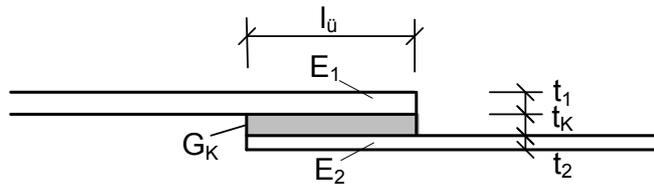
Bei reinen Metallverklebungen nimmt mit wachsender Zugfestigkeit der Füge­teile auch die Klebfestigkeit zu. Bei Kunststoff-Metall-Klebeverbindungen hat die Zugfestigkeit des Metallteils keinen starken Einfluss [46].

Einen einfachen Ansatz zur Berechnung der Schubspannungsverhältnisse in der Klebefuge von Überlappungsstößen mit unterschiedlichen Werkstoffen stellt die Gleichung

nach VOLKERSEN [59, 60] dar:

$$\frac{\tau(x)}{\tau_m} = \frac{\rho}{2} \left[ \frac{\cosh(\frac{\rho}{l} \cdot x)}{\sinh(\frac{\rho}{2})} - \frac{(1 - \psi) \cdot \sinh(\frac{\rho}{l} \cdot x)}{(1 + \psi) \cdot \cosh(\frac{\rho}{2})} \right] \quad (3.2)$$

$$\text{mit } \rho = \sqrt{\frac{(1 + \psi) \cdot G_k \cdot l_{\ddot{u}}^2}{E_1 \cdot t_1 \cdot t_k}} \quad \text{und } \psi = \frac{E_1 \cdot t_1}{E_2 \cdot t_2} \quad (3.3)$$



**Abb. 3.12:** Variablendefinition an der einschnittigen Klebung nach [60]

Die Spannungsverteilung nach VOLKERSEN geht von folgenden vereinfachenden Annahmen aus:

- linear-elastisches Werkstoffverhalten von Fügepart und Klebschicht,
- reine Schubbeanspruchung in der Klebefuge,
- homogener Werkstoffaufbau und
- kein Biegemoment in der Verbindung.

Wird als Annahme noch von gleicher Geometrie und gleichem Werkstoff der Fügepart ausgegangen, z. B. bei einer reinen Metallklebung, erhält man nach [41] die Beziehung zwischen maximaler und mittlerer Schubspannung  $\tau_{max}$  und  $\tau_m$ :

$$\frac{\tau_{max}}{\tau_m} = \sqrt{\frac{G_k \cdot l_{\ddot{u}}^2}{2 \cdot E \cdot t \cdot t_k}} \coth \sqrt{\frac{G_k \cdot l_{\ddot{u}}^2}{2 \cdot E \cdot t \cdot t_k}} \quad (3.4)$$

$$\text{mit } t = t_1 = t_2 \quad \text{und } E = E_1 = E_2 \quad (3.5)$$

Bei gleicher Geometrie ergibt sich aus (3.4) für eine besonders hohe Klebfestigkeit ein möglichst kleines Verhältnis von  $\frac{G_k}{E}$ . Die Kombination aus weichem, deformierbarem Klebstoff und starren und wenig deformierbaren Fügeparten vermeidet am besten hohe Spannungsspitzen.

GOLAND und REISSNER erweitern in [61] die Gleichung (3.4). Neben dem Kräftegleichgewicht in Lastrichtung wird auch das Kräftegleichgewicht senkrecht und das Biegemoment berücksichtigt.

### 3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche

Die Betrachtung nach GOLAND und REISSNER führt zu höheren maximalen Schubspannungen als die nach VOLKERSEN. ULMER vergleicht in [41] beide Ansätze mit eigenen Versuchsergebnissen und stellt fest, dass sich durch das reale Klebstoffverhalten mit plastischen Verformungseigenschaften deutlich geringere Spannungsspitzenfaktoren aus dem Verhältnis  $\tau_{Bmax}/\tau_B$ , ergeben und beide Ansätze unter Verwendung des elastischen Schubmoduls  $G_k$  die maximale Beanspruchung der Klebschicht überschätzen. In die Berechnung ist sozusagen eine Festigkeitsreserve eingebaut.

HART-SMITH erweitert den Ansatz von GOLAND und REISSNER um die Berücksichtigung des Einflusses der Klebschicht auf die Fügeteilbiegung und berücksichtigt durch spezielle Korrekturfaktoren anisotrope Eigenschaften der Fügeteile (z. B. für FVK). HAHN beschreibt in [62] diese Zusammenhänge ausführlich.

HABENICHT stellt in [14] weitere Ansätze verschiedener Autoren zusammen, die z.T. hohen mathematischen Aufwand für die Berücksichtigung eines nichtlinearen Spannungs-Verformungs-Verhaltens bedeuten und meist die Kenntnis zeit- und belastungsabhängiger Kenngrößen des jeweiligen Klebstoffes voraussetzen. Außerdem gibt es eine Vielzahl von Ansätzen zur Berechnung von Klebschichten, die auf der Auswertung von experimentellen Befunden beruhen und oft nur eingeschränkt auf bestimmte Klebstoffe und Fügeteilwerkstoffe und -geometrien angewendet werden können und meist spezielle Nomogramme und Diagramme erfordern. Verfahren, die auf eigene Versuche angewendet werden können, sind versuchstechnisch so aufwändig zu begleiten, dass sie für die Lösung von einzelnen Klebeaufgaben, wie im Bauwesen üblich, unverhältnismäßig wären.

Die analytischen Ansätze sind aufgrund der komplexen Zusammenhänge innerhalb einer Verklebung nicht handhabbar und nur für Metallverklebungen bearbeitet worden. Für Kunststoffklebeverbindungen existieren noch keine mathematischen Ansätze, die mit den Methoden aus dem Metallbereich vergleichbar wären [32, 14]. Die gleiche Aussage trifft auf die Kombination von Metall-Kunststoff-Verklebungen zu. Durch die starke Verflechtung der Einflussgrößen auf die Festigkeit einer Verklebung sollten die experimentellen Verfahren gegenüber den Berechnungsverfahren bevorzugt werden [41].

Es gibt viele ungeklärte Einflussgrößen die sich auf die Festigkeitsberechnung auswirken:

- viskoelastisches und viskoplastisches Verhalten der Kunststoffe,
- große Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften selbst im Bereich von 20 bis 100°C,
- sehr geringer Hook'scher Bereich, die Elastizitätstheorie besitzt begrenzte Gültigkeit,
- Materialbruch der Kunststoffe weit unterhalb der rechnerischen Materialfestigkeit.

Im Kap.5 und 6 wird in Kombination aus einfach ausführbaren Zugversuchen und Berechnungen an finiten Elementmodellen eine handhabbare Vorgehensweise zur Dimensionierung einer Verklebung aufgezeigt.

In Bruchversuchen an originalgetreuen Bauteilproben gleicher Geometrien werden die Tragfähigkeiten bestimmt und statistisch ausgewertet, um einen zulässigen Belastungshorizont anhand eines geeigneten Sicherheitskonzeptes festzulegen (Kap. 4.2).

Zusammenfassend kann man davon ausgehen, dass mit analytischen Berechnungsalgorithmen die Kunststoff/Metall-Verklebungen nicht zufriedenstellend berechnet werden können oder unverhältnismäßig viele Versuche begleitend durchgeführt werden müssten. Durch die Vielzahl nichtlinearer Abhängigkeiten innerhalb der Verklebung wird deshalb auf numerische Berechnungswerkzeuge zurückgegriffen.

#### 3.5.3 Geometrieinflüsse auf die Tragfähigkeit der Klebverbindung

An dieser Stelle werden aus den Erfahrungen anderer Autoren die Einflüsse verschiedener Geometriegrößen auf die Eigenschaften der einschnittigen Verklebung zusammengestellt. Eine umfassende Recherche wurde dazu von MONIATIS erarbeitet [46].

Die *Überlappungslänge*  $l_{\ddot{u}}$  hat einen wesentlichen Einfluss auf die Klebfestigkeit und die übertragbare Kraft der einschnittig überlappten Verbindung. Mit zunehmendem  $l_{\ddot{u}}$  nimmt die Klebfestigkeit ab, wobei das Maß der Verminderung von den plastischen Verformungseigenschaften des Klebstoffs abhängt. Die übertragbare Kraft lässt sich nicht beliebig steigern. Für kleine  $l_{\ddot{u}}$  verhält sich die Bruchlast  $F_B$  proportional, da die Adhäsions- und Kohäsionsfestigkeit der Klebschicht bestimmend sind. Mit zunehmendem  $l_{\ddot{u}}$  und steigender Last beginnen sich die Fügeiteile zu verformen und auch die Normalspannungen am Überlappungsende aus dem wachsenden Biegemoment gewinnen an Bedeutung. Es kommt zur deutlichen Spannungsüberhöhung im Klebstoff am Überlappungsende. Sobald die Fügeiteilwerkstoffe den Bereich der Streckgrenze erreichen, treten große lokale Verformungen am Überlappungsende auf, die der Klebstoff nicht mehr aufnehmen kann. Die Auslastung der Fügeiteile beeinflusst die optimale Überlappungslänge und ist von deren Dicke  $t$  und der *Materialfestigkeit* abhängig. Bei Metallen ist die Streckgrenze entscheidend [14]. Die Zugscherfestigkeit der Klebung steigt mit zunehmender Streckgrenze der Fügeiteile [41]. Bei sonst gleichen Randbedingungen erhöht sich die optimale Überlappungslänge mit der Fügeiteildicke. Bei Überschreitung der optimalen Überlappungslänge nimmt die absolute Bruchlast wieder ab. Als Anhaltswert für eine einfache Überlappung können für Metallverklebungen  $l_{\ddot{u}} \approx 10 - 20 \times t$  und für Kunststoffe  $l_{\ddot{u}} \approx 5 - 10 \times t$  angesetzt werden [14]. Für gleiche Fügeiteildicken und -materialien lässt sich

### 3 Lösbares Verbinden von FVK-Bauteilen über verklebte Stahlanschlussbleche

die optimale Überlappungslänge angeben zu

$$l_{\ddot{u} \text{ opt}} = \frac{R_p \cdot t}{\tau_B} . \quad (3.6)$$

Die Auslegung der Überlappungslänge nach HART-SMITH unter Einbeziehung eines Kriechschutzes für Langzeitbelastungen wird in Kap. 2.9.4 erläutert.

Die *Fügeteildicke*  $t$  geht linear in die Dehnsteifigkeit  $EA$ , die Bruchkraft  $F_B$  der Fügeteile und in das Anschlussmoment aus Exzentrizität der Verbindung ein. Sie wirkt sich mit der dritten Potenz auf die Biegesteifigkeit  $EI$  aus. Da die Biegesteifigkeit überproportional gegenüber dem Biegeverformung erzeugenden Moment wächst, sind dicke Fügeteile günstiger als dünne. Die Fügeteildicke  $t$  sollte auf jeden Fall so groß sein, dass keine plastischen Dehnungen in den Fügeteilen hervorgerufen werden. Größere Fügeteildicken führen bei gleicher Last durch die verringerte Eigendehnung zu einer Vergrößerung der lastabtragenden Flächenanteile der Klebschicht [41] und der Klebfestigkeit [46]. Die ungünstigere Fugennormalspannung ist direkt proportional zum Anschlussmoment.

Eine Erhöhung der Dehnsteifigkeit  $EA$  über eine größere Fügeteildicke und oder einen größeren Elastizitätsmodul in einer einschnittigen Verbindung führt zu unsymmetrischen Spannungsverteilungen mit Spannungskonzentrationen im dünneren Fügeteil am freien Ende des dickeren bzw. der Klebschicht an dieser Stelle [46].

Abnehmende Fügeteildicken zum Überlappungsende hin erhöhen lokal das Verformungsvermögen und wirken festigkeitssteigernd durch Reduktion der Spannungsspitzen. Laut ULMER rechtfertigt die geringe Auswirkung den Fertigungsaufwand nicht [41]. Er schlägt die Kombination unterschiedlich schubsteifer Klebstoffe in einer Klebefuge vor. Der weichere Klebstoff an den Überlappungsenden vermag den großen Verschiebungen durch Fließen zu folgen, während der steifere Klebstoff im Mittelbereich stärker an der Lastabtragung beteiligt wird. ULMER erreichte Steigerungen der Zugfestigkeit an reinen Metallklebungen von 20 bis 25 %. Ein Optimum an Festigkeit erwartet er für einen Schubmodulverlauf, der über die Überlappungslänge umgekehrt proportional zur Spannungsverteilung angepasst wird.

Der Einfluss der *Klebschichtdicke*  $t_k$  von starren Dünnschichtverklebungen ist im Kapitel 2.9.4 zusammengestellt. Die Idealdicke liegt bei 0,05 bis 0,2 mm [14]. Eine dickere Klebschicht beginnt erst bei höherer Gesamtverschiebung mit Fließen, erreicht aber keine höhere Scherfestigkeit als eine dünnere, weil u.a. die Querkontraktionsbehinderung und die Scherbruchfestigkeit der Klebschicht abnehmen [41]. Weitere Gründe für den Abbau der Güte bei dickeren Klebschichten wird in höheren Schrumpfspannungen aus dem Aushärteprozess und in der erhöhten Möglichkeit von Fehlstellen gesehen. Das Zeitstandsverhalten ist bei

dünnen Klebefugen am günstigsten. Mit zunehmender Klebschichtdicke nehmen neben der Bruchkraft, die Schubfestigkeit und die Bruchgleitung ab. Der Schubmodul nimmt zu und strebt einem Grenzwert entgegen [46].

Die *Fügeteilbreite*  $b$  geht ab einer Mindestbreite linear in den Bruchwiderstand einer Klebung ein und beeinflusst die Klebfestigkeit nicht [46].

Ein *Abschrägen der Fügeteile* am freien Ende der Überlappung reduziert die Spannungsspitzen im Klebstoff. Die Festigkeitssteigerung ist allerdings gering. Ein Abschrägen der Fügeteile auf der Innenseite hat eine größere Klebschichtstärke zu Folge und bewirkt eine geringe Steigerung der Bruchkraft [46].

Mit steigendem *Elastizitätsmodul* und *Schubmodul der Klebschicht* nehmen die Normal- und Schubspannungen zu, wobei die meisten Klebstoffe nach dem Verlassen des elastisch-viskoelastischen Bereichs durch plastische Verformungen zum Abbau der Spitzen fähig sind [46].

## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Statistische Auswertung von Versuchsergebnissen

Über die statistische Auswertung von Stichproben aus Versuchen wird auf Eigenschaften der Grundgesamtheit geschlossen. Der geschätzte Mittelwert der Grundgesamtheit  $m$  ergibt sich demnach aus dem arithmetischen Mittelwert  $\bar{x}$  (4.1).

$$m = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n x_i \quad (4.1)$$

Die Varianz  $s^2$  (4.2) ist erwartungstreu.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_i^n (\bar{x} - x_i)^2 \quad (4.2)$$

Der Schätzwert der Standardabweichung  $s$  (4.3) nach der auf den Varianzbegriff zurückgehenden Methode von GAUSS [63] unterschätzt dagegen grundsätzlich die Standardabweichung  $\sigma$  der Grundgesamtheit.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_i^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (4.3)$$

Die systematische Fehleinschätzung (Verzerrung bzw. Bias) ist besonders deutlich bei geringen Stichprobenumfängen. HÜCK empfiehlt in [64] eine Korrektur von  $s$  (4.3) über einen Faktor  $F_b$  (4.4).

$$F_b = \sqrt{\frac{n-0,41}{n-1}} \quad (4.4)$$

Mit (4.4) ändert sich (4.3) zu

$$s = \sqrt{\frac{n-0,41}{(n-1)^2} \cdot \sum_i^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (4.5)$$

#### 4.1 Statistische Auswertung von Versuchsergebnissen

Die Werkstoffversuche (Kap. 4.4) geben als Ergebnis die Kombination  $\bar{x} \pm s$  an. In den Diagrammen der Zugscherversuche (Abb. 4.26, 4.39) werden die Mittelwerte und die 5 % bzw. 95 % - Quantile bei 75 % Konfidenz aufgetragen. In allen Fällen einer statistischen Bewertung von Versuchs- oder Berechnungsgrößen wird mit der fehlerfreien Standardabweichung nach (4.5) gearbeitet.

Die Dichtefunktion  $\varphi(x)$  der Gauß'schen Normalverteilung ist eine symmetrische Glockenkurve, die durch Mittelwert  $\mu$  und Standardabweichung  $\sigma$  der Grundgesamtheit gesteuert wird und für  $x = \mu \pm \sigma$  Wendepunkte besitzt.

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

Durch Substitution  $u = \frac{x - \mu}{\sigma}$  und Setzen von  $\sigma = 1$  erhält man die Standard-Normalverteilung mit der Dichtefunktion  $\varphi_0(u)$ .

$$\varphi_0(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot u^2 \right] \quad (4.7)$$

Die Integration der Dichtefunktion (4.6) führt zur Verteilungsfunktion  $\phi(u)$  der Normalverteilung. Mit der Normierung  $\frac{x - \mu}{\sigma} = t = u$  und  $dx = \sigma \cdot dt$  folgt:

$$\phi(u) = \int_{x=-\infty}^u \varphi(x) \cdot dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{t=-\infty}^u \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot t^2 \right] \cdot dt \quad (4.8)$$

Die Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung  $\phi_0(u)$  entspricht  $\phi(u)$ .

Die Fläche unter der Dichtefunktion  $\varphi(u)$  entspricht der Wahrscheinlichkeit  $P$ . Die Teilfläche bis zu einem Fraktilewert (Quantil)  $u_p$  entspricht der Wahrscheinlichkeit  $p$  und somit dem Funktionswert  $\phi(u_p)$  der Verteilungsfunktion (Abb. 4.1):

$$p = \phi(u_p) \quad (4.9)$$

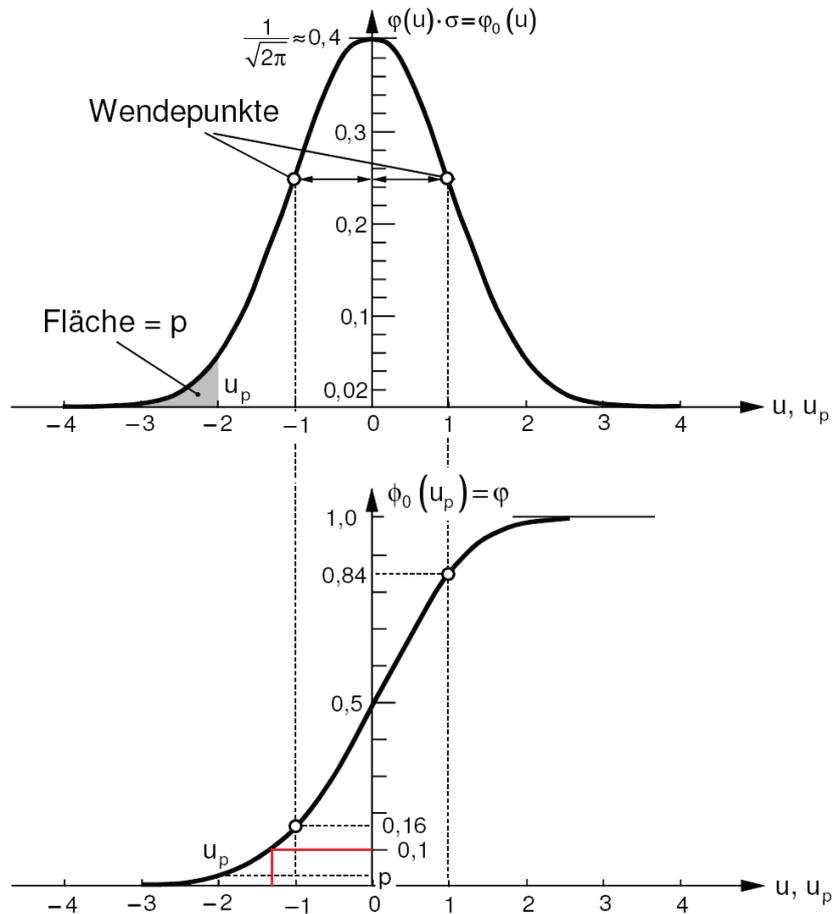
Die Lösung des Integrals (4.8) kann nur numerisch erfolgen und führt zu einer Tabellierung der Fraktile  $u_p$  und den entsprechenden Wahrscheinlichkeiten  $p = \phi(u_p)$  z. B. in [65].

Hervorzuheben sind die Werte  $u_p = \pm 1$  an den Wendepunkten (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) mit den zugeordneten Wahrscheinlichkeiten von 0,16 und 0,84.

Aus der Kenntnis der Fraktilewerte  $u_p$  und der Wahrscheinlichkeiten  $p$  der Standard-Normalverteilung lassen sich die Schätzwerte  $x_p$  für Kennwerte der Zufallsgröße  $x$  ableiten, für die aus Messungen der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$  und die Standardabweichung  $s$  bekannt sind.

$$x_p = \bar{x} + u_p \cdot s \quad (4.10)$$

#### 4 Experimentelle Untersuchungen



**Abb. 4.1:** Verteilungs- und Dichtefunktion der Standard-Normalverteilung [65]

Für eine gewünschte Wahrscheinlichkeit von  $p = 0,10$ , d.h. für die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsgröße  $x$  Werte kleiner oder gleich  $x_p$  annimmt, kann der Fraktilewert  $x_{0,1}$  abgeschätzt werden mit  $u_{p=0,1} = -1,28$ :

$$x_{0,1} = \bar{x} - 1,28 \cdot s \quad (4.11)$$

Für die symmetrischen Fraktile auf der Gegenseite der Glockenkurve gilt entsprechend der positive Wert von  $u_p$ . Weitere wichtige Fraktilewerte für  $n = \infty$  sind:

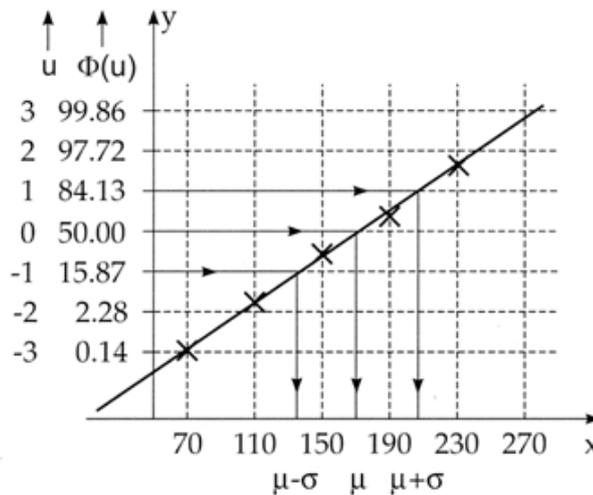
$$\begin{aligned} x_{0,05/0,95} &= \bar{x} \pm 1,65 \cdot s \\ x_{0,01/0,99} &= \bar{x} \pm 2,33 \cdot s. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Die Abschätzung, ob eine Stichprobe näherungsweise normalverteilt ist, lässt sich sehr anschaulich mit einem Wahrscheinlichkeitsnetz vornehmen. Es muss sich durch die eingetragenen Punkte der Summenhäufigkeiten sowie aus den der Größe nach geordneten Werten der Stichprobe in etwa eine Gerade zeichnen lassen. Die Gerade muss sich ergeben, da die Ordinatenachse gleichabständig bezüglich  $u$  unterteilt, aber mit  $\phi(u)$  beziffert ist.

Es lassen sich für

$$\begin{array}{lll}
 u = 0 & \text{bzw. } \phi(u) = 0,5 & \mu \\
 u = 1 & \text{bzw. } \phi(u) = 0,84 & \mu + \sigma \\
 u = -1 & \text{bzw. } \phi(u) = 0,16 & \mu - \sigma
 \end{array} \tag{4.13}$$

sofort in der Darstellung ablesen [66, 65]. Wahrscheinlichkeitsnetze werden im Kapitel 4.2 verwendet und sind im Anhang A abgebildet. Die Konfidenz gibt einen Vertrauensbereich



**Abb. 4.2:** Beispiel eines Wahrscheinlichkeitsnetzes, aus [13]

eines geschätzten Wertes an. Sie sagt etwas über die Präzision der Lageschätzung eines Parameters aus. Mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit wird die Lage eines geschätzten Parameters auf einen Bereich eingegrenzt. Breite Vertrauensbereiche deuten auf zu kleine Stichprobenumfänge hin, bzw. zeugen von einer schlechten Aussagequalität. Für die Auswertung von Versuchsgrößen von Bauteilen, Baustoffen und Bauarten mit begrenztem Stichprobenumfang wird in [67] eine Auswertung bei 75% Konfidenz empfohlen. Als charakteristische Werte werden im Bauwesen 5%-Quantile verwendet. Der statistische Schätzwert dieser Quantilsgröße ergibt sich bei unbekannter Standardabweichung aus dem Mittelwert und dem skalierten Schätzwert der Standardabweichung zu

$$x_{0,05} = \bar{x} + k_s \cdot s, \tag{4.14}$$

wobei  $k_s$  entsprechend dem Stichprobenumfang  $n$  zu ermitteln ist s. Tab. 4.1.

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	35
$k_s$	3,15	2,68	2,46	2,34	2,25	2,19	2,14	2,10	1,99	1,93	1,85

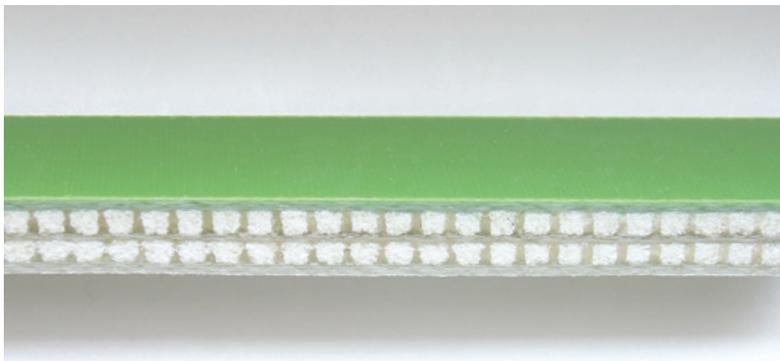
**Tabelle 4.1:** 5%-Quantilfaktoren bei unbekannter Standardabweichung  $\sigma$  nach [67]

## 4.2 Bauteilähnliche Versuche an geklebten Stahlanschlussblechen

### 4.2.1 Vorbemerkungen und Randbedingungen

In einer Reihe von Bruchversuchen werden verschiedene Lastanschlussbleche von GFK-Probekörpern abgerissen. Die Versuche sollen die Leistungsfähigkeit der flächigen Krafteinleitung über Stahlanschlussteile belegen. Es variieren die Randbedingungen der Probekörper (Abmessungen und Lagerung) sowie der Blechtyp in Bezug auf Abmessungen, Ausrichtung und Anschlussstyp. Es gibt zwei Anschlussstypen. Zum einen werden die Bleche (Typ I und Ia) mit einer aufgeschweißten Stahllöse versehen, sodass beispielsweise ein Hakenverschluss angreifen kann (Abb. 4.4, 4.5, 4.6). Der zweite Blechtyp ist mit Stahlschienen versehen (Typ II), die ein seitliches Einschieben eines Fußbleches eines Verbindungsbügels ermöglichen (Abb. 4.7).

### 4.2.2 Probengeometrie, Werkstoffe und Probenbezeichnung



**Abb. 4.3:** Querschnitt des verwendeten GFK-Sandwichs

Das faserverstärkte Grundmaterial ist ein 13 mm polyesterharzgebundener, glasfaserverstärkter symmetrischer Sandwichquerschnitt mit 9 mm Kernlage aus einem zweilagigen harzgetränkten Schaumvlieskern. Diese beiden Schichten sind mit einer Mattenzwischenlage ( $450 \text{ g/m}^2$ ) gekoppelt. Der Decklagenaufbau ergibt sich auf beiden Seiten des Kerns aus fünf tragenden Schichten. Abwechselnd werden drei Lagen  $0/90^\circ$ - und zwei Lagen  $\pm 45^\circ$ -Leinwandglasgewebe mit  $300 \text{ g/m}^2$  im manuellen Arbeitsprozess auf einer einseitigen ebenen Gegenform verarbeitet. Die innenseitige Oberflächenschicht bildet zusätzlich ein leichtes  $165 \text{ g/m}^2$  Gewebe in  $0/90^\circ$ -Ausrichtung. Auf dieser Laminatschicht erfolgt die Verklebung mit den Lastblechen.

#### 4.2 Bauteilähnliche Versuche an geklebten Stahlanschlussblechen

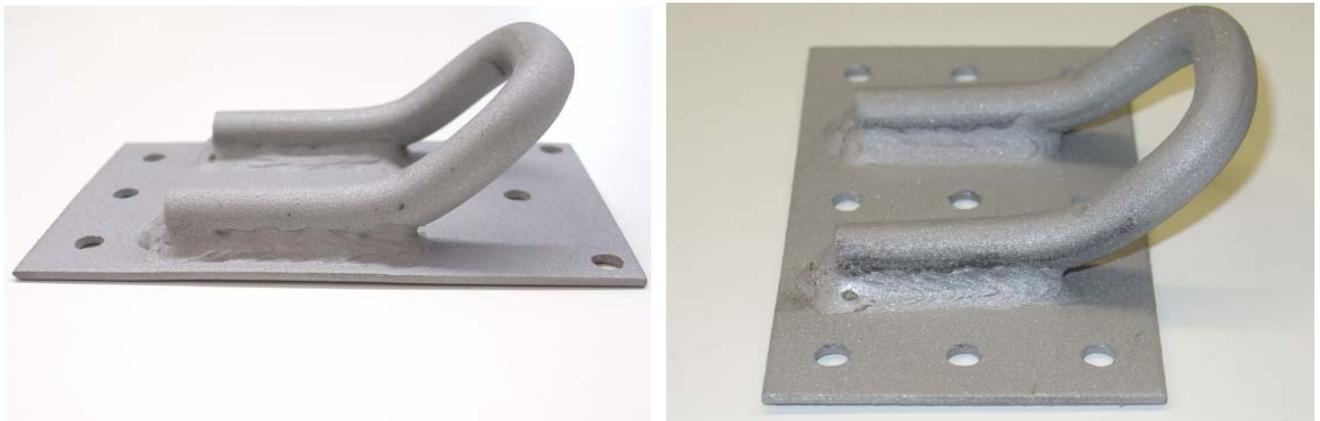
Für den Laminatanteil im Sandwich ergibt sich aus Glührückstandsversuchen nach DIN EN ISO 1172 [68] aus sechs Einzelwerten ein Glasmasseanteil von  $58\% \pm 1,17\%$  ( $\bar{x} \pm s$ ). Eine Umrechnung des Glasmassenanteils  $\psi$  in einen Faservolumenanteil  $\phi$  ist nach [69] möglich mit

$$\phi = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_M}} \quad (4.15)$$

Für den Glasmasseanteil  $\psi = 0,58$  ergibt sich mit der Matrixdichte des UP-Harzes von  $\rho_M = 1,219 \frac{g}{cm^3}$  und der E-Glasdichte  $\rho_F = 2,52 \frac{g}{cm^3}$  ein Faservolumenanteil  $\phi = 0,40$ .

Für den Einsatz unter freier Bewitterung kommen in erster Linie Bleche aus Edelstahl Rostfrei in Betracht. Klebversuche zwischen verschiedenen Stahlblechsorten und Pultrusionsprofilen wurden u.a. an der RWTH Aachen durchgeführt [70]. Dabei wurde festgestellt, dass die Stahlart keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit hat, da das Versagen immer in den Oberflächenschichten des GFK auftrat.

Für die Kurzzeitbruchversuche im Rahmen dieser Arbeit wird auf den Einsatz von Edelstahl aus wirtschaftlichen Gründen zu Gunsten von blankem S235JR verzichtet. Aufgrund der Korrosionsanfälligkeit dieser Bleche wird darauf geachtet, dass der Einbau unmittelbar nach deren Reinigung stattfindet. Mit einer Sandstrahlbehandlung werden die Oberflächen

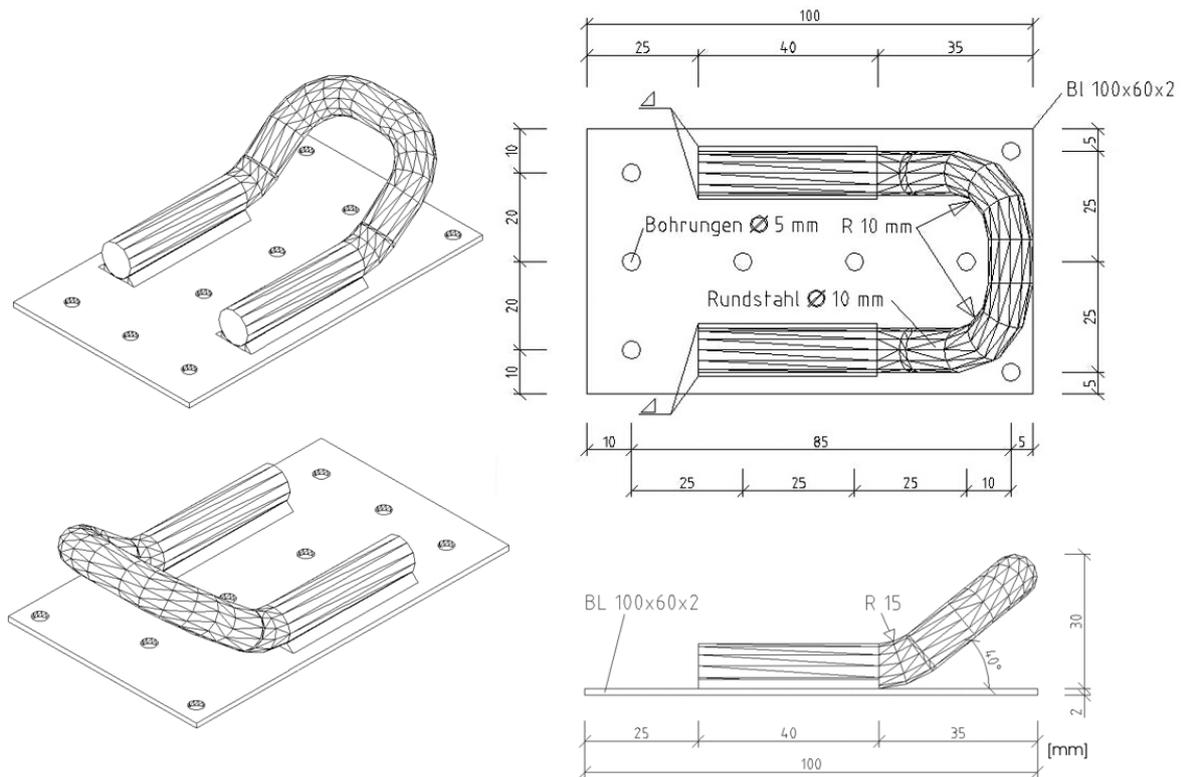


**Abb. 4.4:** links: Stahlblech Typ I, rechts: Stahlblech Typ Ia

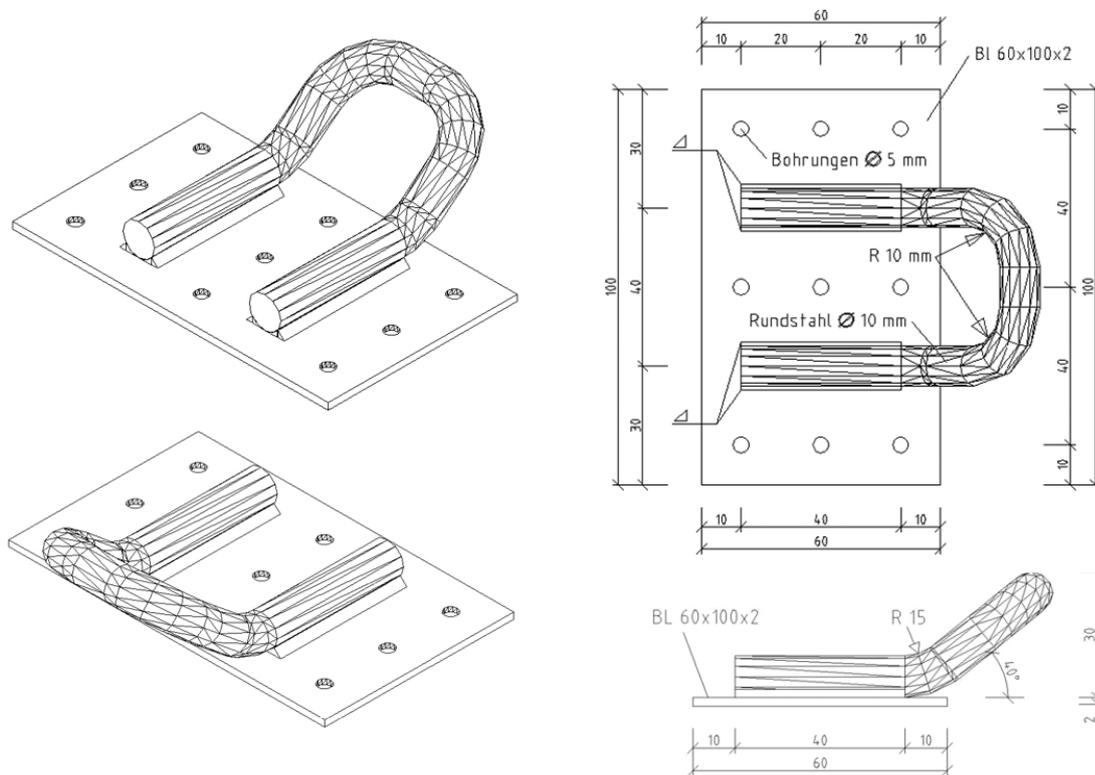
von Verunreinigungen befreit und angeraut, nachdem eine Vorreinigung mit Aceton erfolgte. Das anschließende Acetonbad fand unmittelbar vor der Verklebung statt. Die Sandwichplatte wird mit rotierenden Stahlbürsten aufgeraut bis die oberste Gewebelage frei liegt, aber ohne deren Fasern zu zerstören. Vorher und als Abschluss werden die Klebeflächen mit einem acetongetränkten Tuch abgewischt.

Die Stahlklebeflächen ergeben sich beim Typ I zu  $600 \text{ mm}^2$  und beim Typ II zu  $1580 \text{ mm}^2$ .

## 4 Experimentelle Untersuchungen



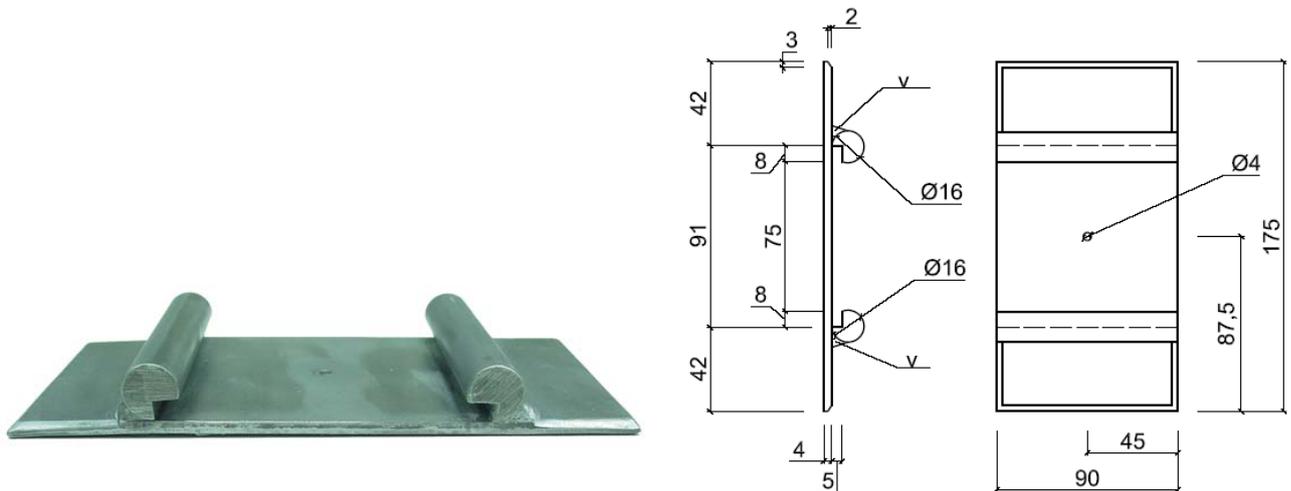
**Abb. 4.5:** CAD-Zeichnung für Typ I



**Abb. 4.6:** CAD-Zeichnung für Typ Ia

#### 4.2 Bauteilähnliche Versuche an geklebten Stahlanschlussblechen

Die Bleche sind unterschiedlich dick. Der Typ I misst 2 mm und Typ II 4 mm. Der Grundriss ist rechteckig mit den Abmessungen Typ I  $100 \times 60$  mm und Typ II  $175 \times 90$  mm. In den Bruchversuchen sind die Bleche längs zur Kraft ausgerichtet. Eine Ausnahme bildet eine Sonderform Typ Ia (Abb. 4.6), bei der das Blech quer zur Lastrichtung angeordnet ist.



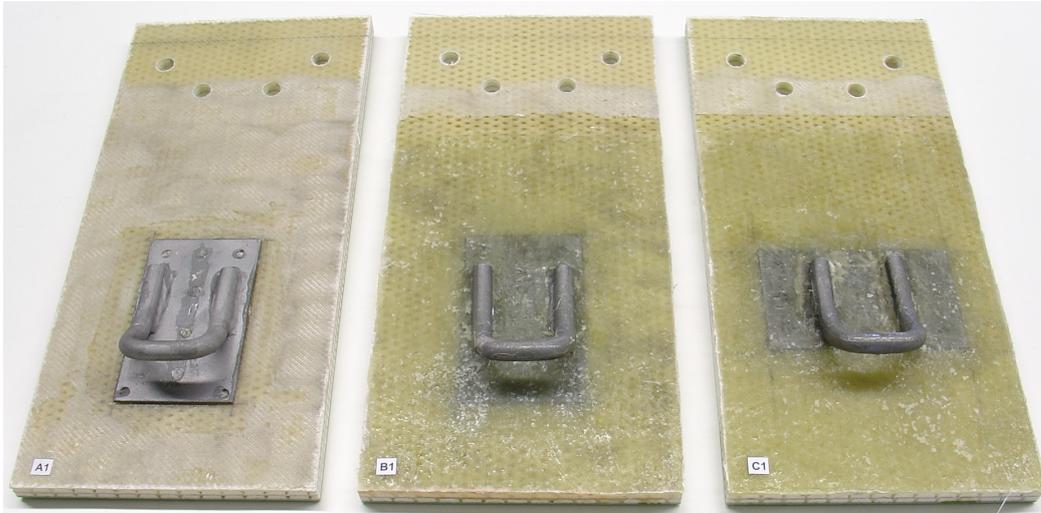
**Abb. 4.7:** Stahlblech Typ II links: Ansicht, rechts: CAD-Zeichnung

Als Klebstoff wird für die Bruchversuche das Laminierharz selbst verwendet. Der Grund liegt im teilweisen Einlaminieren der Bleche in zusätzliche Gewebelagen. Die Bleche werden in den Schichtaufbau integriert. Die Verwendung eines einheitlichen Harzsystems für den gesamten Handlaminierprozess wird als technologisch vorteilhaft gesehen. Mit deutlich hochwertigeren Klebstoffen würde man dennoch an ein GF-UP-Laminat anschließen, das begrenzte Festigkeiten aufweist.

Zum Aufkleben der Bleche auf das GFK wird aus dem Laminierharz durch Zusatz von geschnittenen Kurzglasfasern und Cellulosemehl eine pastöse Polyestermaße erzeugt. Die Bleche werden großzügig auf der Klebefläche bestrichen und per Schaubzwinge gegen das Laminat gepresst, sodass überschüssiger Klebstoff seitlich oder über die Bohrungen in den Blechen entweichen kann und geringe Klebschichtdicken entstehen. Austretende Klebstoffreste werden im frischen Zustand entfernt.

Zwei unterschiedliche Randbedingungen für die Versuchskörper werden verglichen. Zum einen werden die Bleche auf kompakte  $350 \times 200$  mm-GFK-Sandwichplatten laminiert (Abb. 4.8), die in der Prüfmaschine keine zusätzliche Führung erhalten. Zum anderen werden größere Grundplatten mit  $350 \times 600$  mm (Abb. 4.9) gleichen Aufbaues im Versuchsstand seitlich geführt, um die Kontinuität eines größeren Tragwerks auf den Versuch zu übertragen. Erkenntnisse zum Einfluss des Probekörperzuschnitts auf das

#### 4 Experimentelle Untersuchungen



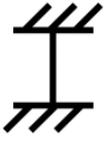
**Abb. 4.8:** Probekörper der Serien A, B und C auf kompakter Grundplatte 350×200 mm



**Abb. 4.9:** Herstellung des Auflaminats für die Proben, links: Serie E, rechts: Serie F

Bruchlastniveau sind von hohem Interesse für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Bauteile. Das Versuchsprogramm umfasst sechs Versuchsserien (Tab. 4.2). Für die Blech-typen I und II gibt es jeweils eine Serie auf beiden Grundplatten. Zusätzlich werden Bleche vom Typ Ia mit Auflaminat als Serie C zur Prüfung des Einflusses der Blech-ausrichtung auf der kompakten ungestützten Grundplatte untersucht. In Serie A wird das Blech vom Typ I ohne Auflaminat auf die kompakte Grundplatte geklebt, um die Tragfähigkeit der reinen Verklebung abschätzen zu können. Die Untersuchung einer gedrehten Blech-ausrichtung für Typ II ist konstruktiv nicht sinnvoll, da die Montage- und die Tragrichtung zu unterscheiden sind. Die beiden Anschlussvarianten zu den Blechen Typ I und II unterscheiden sich prinzipiell. Die Lastbleche Typ I und Ia mit Öse ermöglichen einen gelenkigen Kraftanschluss, der aufgrund der nötigen Dimensionen der Öse zum Einhaken eines Schließ- oder Spann-

#### 4.2 Bauteilähnliche Versuche an geklebten Stahlanschlussblechen

Versuchsprogramm		
kompakte Probe ungestützt	A,B (Typ I) C (Typ Ia)	F (Typ II)
große Probe geführt	D (Typ I)	E (Typ II)

**Tabelle 4.2:** Versuchsprogramm

arms eine Exzentrizität von 27 mm zur Klebefuge aufweist (Abb. 4.5, 4.6). Der Blechtyp II ermöglicht durch den flachen seitlichen Einschub in zwei aufgeschweißte Schienen eine Übertragung von Kräften und Momenten, wobei die Anschluss exzentrizität zur Klebefuge mit 7 mm gering bleibt (Abb. 4.7).

Das Versuchsprogramm umfasst die sechs Serien A bis F mit insgesamt 34 Versuchen (Tab. 4.2 und Anh. A):

- Serie A - geklebte Bleche Typ I auf kleinen, nicht geführten Probekörpern, n = 6
- Serie B - überlamierte Bleche Typ I auf kleinen, nicht geführten Probekörpern, n = 6
- Serie C - überlamierte Bleche Typ Ia auf kleinen, nicht geführten Probekörpern, n = 5
- Serie D - überlamierte Bleche Typ I auf großen, geführten Probekörpern, n = 6
- Serie E - überlamierte Bleche Typ II auf großen, geführten Probekörpern, n = 6
- Serie F - überlamierte Bleche Typ II auf kleinen, nicht geführten Probekörpern, n = 5

#### 4.2.3 Probenherstellung

Die Herstellung der Probekörper umfasste die Fertigung der Bleche, das Laminieren, das Zuschneiden und Bohren der Sandwichgrundplatte, die Oberflächenvorbereitung von Stahl und GFK und das Aufkleben und Überlaminieren der Stahlteile (Abb. 4.9). Die Prüfkörper wurden bei 60°C für acht Stunden getempert.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

Das Auflaminat ist eine lokale Verstärkung, die die Fläche des Lasteintrages vergrößert. Das Einbinden des Anschlussbleches in weitere Faserlagen verbessert die Verbundtragfähigkeit, schützt die Klebefuge vor Umwelteinflüssen und schafft ein duktiler Bruchverhalten. Die untersuchten Proben werden mit einem Auflaminat über dem Stahlblech aus fünf Schichten versehen. Über die Bleche wird  $300 \text{ g/m}^2$  - Glasgewebe in den Lagen,  $0/90^\circ$ , zweimal  $\pm 45^\circ$  und  $0/90^\circ$  laminiert. Das Auflaminat schließt eine Matte mit  $450 \text{ g/m}^2$  ab. Der Randüberstand um die Stahlbleche beträgt 5 cm.

### 4.2.4 Versuchsdurchführung

Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur zwischen  $20$  und  $23^\circ\text{C}$  weggesteuert mit  $5 \text{ mm/min}$  bis zum Bruch gefahren (Abb. A.18). Die Versuche liefen auf zwei unterschiedlichen Prüfständen (Abb. 4.10). Die Versuche A - C wurden an der Prüfmaschine TIRATEST 28100 am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Die Serien D - F untersuchte die Versuchstechnische Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar mit einer individuellen Zugvorrichtung.

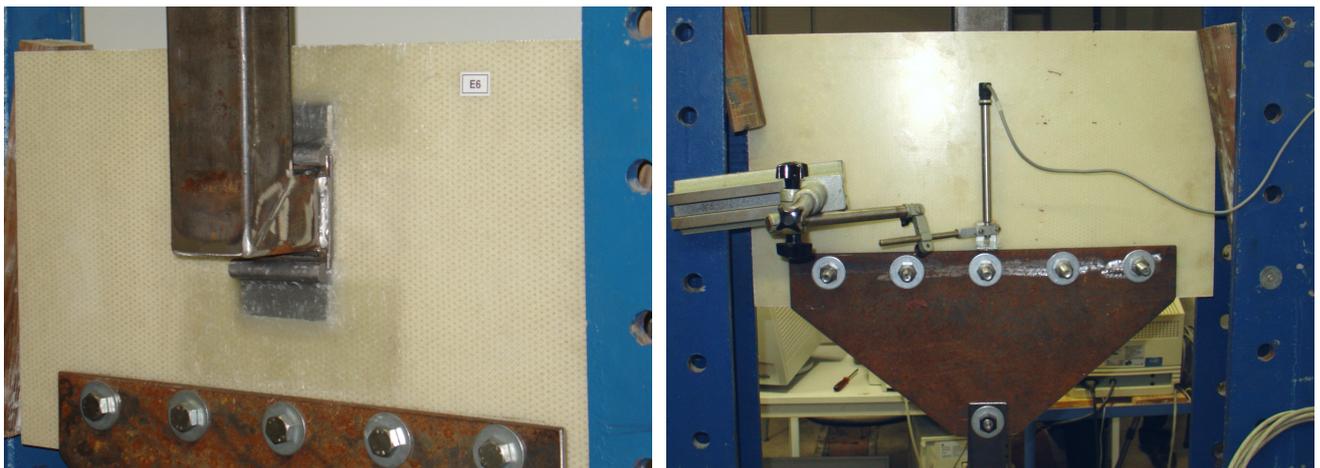
Mit der TIRATEST-Anlage konnte ausschließlich in einer Achse geprüft werden, d.h., dass mit gleicher Exzentrizität zur Probekörperachse an beiden Angriffsenden der Proben gearbeitet werden musste. Die unvermeidliche Anschlusssexzentrizität an der Öse des Blechtyps I wiederholt sich an der Haltevorrichtung auf der Gegenseite (Abb. A.5). Äußerlich war die Probe momentenfrei, allerdings traten im GFK-Sandwich wesentliche Krümmungen infolge Biegebeanspruchung auf. Als Folge daraus sind einige Proben der Serie B und C an der Klemmstelle im Querschnitt gebrochen, bevor der untersuchte Blechanschluss seine Grenzlast erreichte. Die Proben gehen mit der erreichten Bruchlast in die Versuchsauswertung ein.

Die Verformungsmessung erfolgte an der TIRATEST-Anlage über den internen Traversenwegaufnehmer. Am Prüfraumen der VTE wurden mit induktiven Wegaufnehmern der Weg am Hydraulikzylinder und zusätzlich an den Sandwichplatten auf der Rückseite abgegriffen (Abb. 4.11). Der mögliche Schlupf in der Probenhalterung ist in den Wegmessungen zu den Versuchen D - F kompensiert. Der individuelle Prüfraumen der VTE erlaubte mit einseitiger Exzentrizität zu arbeiten. Er war auf eine maximale Last von  $50 \text{ KN}$  ausgelegt. Tatsächlich hat eine Probe der Serie E die Anlage bei  $50 \text{ KN}$  zum Abschalten gezwungen (Abb. A.23). Aus den Bruchlasten der anderen Probekörper und dem Grad der bis dahin erreichten Schädigung war jedoch keine nennenswerte Laststeigerung mehr zu erwarten. Die Probe ging mit dieser Grenzlast in die Versuchsauswertung mit ein.

#### 4.2 Bauteilähnliche Versuche an geklebten Stahlanschlussblechen



**Abb. 4.10:** Prüfstände der bauteilähnlichen Proben, links: Versuchsstand TIRATEST 28100, rechts: individueller Prüfrahm



**Abb. 4.11:** Wegmessung an den Proben der Serien D - F

Obwohl sich der Blechtyp II zum Übertragen von Momenten eignet, beanspruchen die Versuche den Anschluss vorrangig auf Abscheren. Der steife Lastbügel leitet die

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Anschlusskraft auch über Hindernisse wie Bauteilrandaufkantungen hinweg, ohne äußerlich Momente zu übertragen.

Zur Lagerung der Proben in der Prüfmaschine bzw. im Prüfrahmen erhalten die Sandwichproben große Bohrungen, über die 10 mm dicke Stahllaschen mit Schrauben aufgeklemmt werden. Die Laschen sind über mehrere Gelenkpunkte zwängungsfrei am Hydraulikzylinder bzw. an der Traverse angeschlossen. Der Lasteintrag erfolgt durch Reibung der Laschen und durch Lochleibungsdruck der Bolzen. In Vorversuchen erwies sich die direkte Einspannung mit hydraulischen Klemmbacken als ungeeignet. Das in Dickenrichtung weiche Sandwich wurde entweder gleich zertrümmert oder entzog sich durch Kriechen der Klemmkraft und rutschte bei geringen Lasten frühzeitig aus den Spannbacken.

##### 4.2.5 Ergebnisse

Die Tabelle 4.3 enthält alle Bruchkräfte der einzelnen Versuchsserien als Überblick zusammen mit den Schätzwerten der Mittelwerte und der Standardabweichungen sowie der 5% - Quantile einer angenommenen Normalverteilung und der rechnerischen Klebfestigkeit. Die Annahme einer Normalverteilung kann über den Auftrag der jeweiligen Serienergebnisse in einem Wahrscheinlichkeitspapier bestätigt werden (Abb. A.4, A.9, A.14, A.19, A.26, A.32).

Das beobachtete Bruchverhalten der einzelnen Serien unterscheidet sich z.T. erheblich:

- Serie A - nicht überlamierte Bleche Typ I auf kleinen, nicht geführten Probekörpern:  
Die erreichte Bruchlast ist wesentlich geringer als die der anderen Serien. Der Bruch erfolgt plötzlich ohne Vorankündigung durch Ablösen der ersten dünnen Gewebeschicht (Abb. A.1, A.2) aus dem Decklaminat.
- Serie B: - überlamierte Bleche Typ I auf kleinen, nicht geführten Probekörpern:  
Der Bruch kündigt sich durch deutlich vernehmbares Knacken und fortschreitendes Ablösen des Bleches und Auflaminates vom Sandwich an. Der Bruch beginnt am Steifigkeitssprung, dem Übergang der aufgeschweißten Stahlöse zum reinen Blech. Dort werden erste Schäden unmittelbar neben dem Blech unter dem Auflaminat (Abb. A.5, A.8) sichtbar. Das Blech knickt an dieser Stelle plastisch ab und schält sich und die darüberliegenden Schichten duktil ab.
- Serie C - überlamierte Bleche Typ Ia auf kleinen, nicht geführten Probekörpern:  
Durch das gedrehte Blech beginnt das sichtbare seitliche Ablösen, wie bei Serie B, bei höherer Last. Die seitlichen Blechüberstände knicken mit fortschreitender Schädigung

#### 4.2 Bauteilähnliche Versuche an geklebten Stahlanschlussblechen

gung leicht ab und die kurze überstehende Blechkante in Krafrichtung durchbricht im Versagenszustand duktil das Auflaminat (Abb. A.12).

- Serie D - überlamierte Bleche Typ I auf großen, geführten Probekörpern:

Auf größerer Sandwichplatte und mit geführten Seitenkanten kann eine geringe Laststeigerung gegenüber den Ergebnissen der Serie B erreicht werden. Der Bruch kündigt sich lange vor dem Erreichen der maximalen Kraft deutlich hörbar an und setzt an der selben Stelle wie in Serie B ein, dem Steifigkeitssprung vom Bügel der Öse zum Blech (Abb. A.16).

- Serie E - überlamierte Bleche Typ II auf großem, geführtem Probekörpern:

Die zweite Anschlussvariante Typ II ist quantitativ nicht mit dem Typ I vergleichbar. Die Blechgröße und -dicke ist anwendungsbedingt wesentlich größer (Abb. 3.4) und erreicht auf der großen geführten Sandwichplatte höchste Bruchwerte bei duktilem Bruchverhalten, also mit deutlicher Versagensankündigung bei weiterer Laststeigerung (Abb. A.21, A.22)

- Serie F - überlamierte Bleche Typ II auf kleinen, nicht geführten Probekörpern:

Die großen Bleche vom Typ II erreichen auch auf den kleinen ungestützten GFK-Platten ähnlich hohe Werte wie auf den großen Platten. Das Versagen ist weniger duktil. Der Grund wird in dem für die Blechgröße geringem Abstand zum Probenrand gesehen. Es zeigen mehrere Proben nach erster Schadensankündigung ein plötzliches Abplatzen des randseitigen Auflaminats und ein Ausrutschen aus dem gegenüberliegenden überlamierten Ende (Abb. A.27 - A.30).

Der Typ II wurde entwickelt, um bewusst die laminatschädlichen Biegebeanspruchungen und somit Schälbeanspruchungen auf ein Minimum zu reduzieren. Die hohe Traglast spricht für das gesteckte Ziel, mit möglichst wenigen diskreten Verbindungsstellen zu arbeiten und trotzdem materialgerecht und lösbar zu verbinden.

Mit den geführten und ungeführten Proben wurden die „Extremwerte“ der Randbedingungen aus der Tragstruktur eines realen Bauteils für einen Verbindungspunkt abgeprüft. Die geringen Unterschiede in den Bruchwerten zwischen beiden Varianten ermöglichen den Übertrag der Tragfähigkeiten auf gleiche Verbindungspunkte in realen Bauteilen.

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Bruchkräfte [kN]	A	B	C	D	E	F
$n_1$	5,339	18,640	17,598	20,870	47,762	42,136
$n_2$	6,203	17,240	22,241	25,589	46,110	45,288
$n_3$	5,899	18,773	22,522	20,145	48,381	43,686
$n_4$	5,504	17,837	20,790	24,737	50,018	47,314
$n_5$	6,895	19,876	19,122	19,253	49,076	45,335
$n_6$	5,922	19,072	—	21,078	46,566	—
Mittelwert $\bar{x}$	5,960	18,573	20,454	21,945	47,985	44,752
Standardabweichung $s$	0,585	0,981	2,242	2,736	1,573	2,086
5% - Quantil $x_{0,05}$	4,591	16,276	14,940	15,544	44,305	39,619
Stahlklebefläche $A$ in mm <sup>2</sup>	6000	6000	6000	6000	15800	15800
$\tau_{kleb} = \bar{x}/A$ [MPa]	9,93	30,96	34,09	36,58	30,37	28,32

**Tabelle 4.3:** Bauteilähnliche Geometrien: Übersicht der Bruchkräfte Serien A - F

Spannungsbezogen bleiben die großen Bleche Typ II hinter Typ I und Ia zurück. Da sich die rechnerische Klebfestigkeit mit wachsender Überlappungslänge nur unterproportional erhöhen lässt (Kap. 2.9), sind die Ergebnisse der Serien E und F dennoch als qualitative Steigerung zu werten. Die geringe Lastexzentrizität hält Schälspannungen gering und ermöglicht dadurch die hohen nachgewiesenen Bruchkräfte.

Das Deformationsbild der Bleche von Typ I und Ia im Bruchzustand mit dem Abknicken am Steifigkeitssprung am Ende des aufgeschweißten Bügels lässt eine Laststeigerung mit dieser Anschlussgeometrie durch Erhöhung der Biegesteifigkeit über eine vergrößerte Blechdicke erwarten. Da diese Bleche konstruktionsbedingt interlaminaire Zugbeanspruchungen erzeugen, würde ein steiferes Blech die lastabtragende Fläche vergrößern.

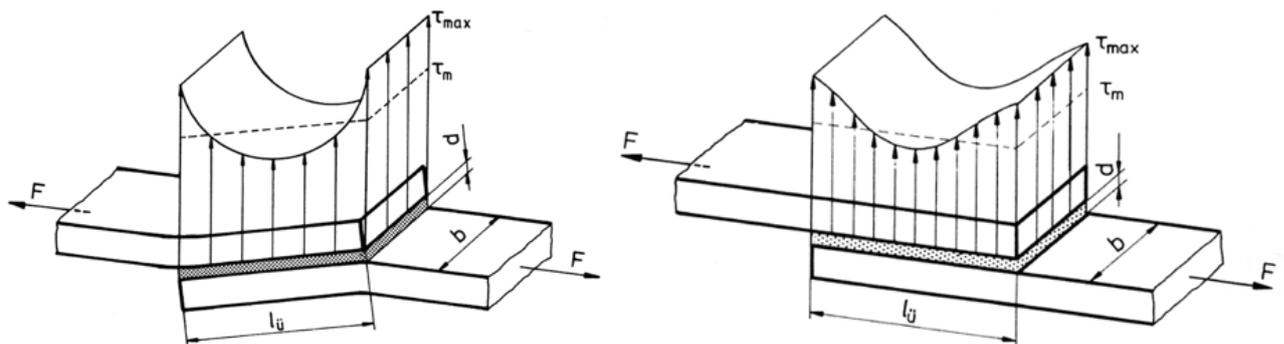
### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben

#### 4.3.1 Vorbemerkungen und Randbedingungen

In einer Parameterstudie werden die Einflüsse aus Klebstoffauswahl und Oberflächenvorbereitung in Coupontests in Anlehnung an die DIN EN 1465 [2] untersucht.

Sechs unterschiedliche Klebstoffe werden mit drei Oberflächenvorbereitungen der Fügeteile an ein- und zweiseitig überlappten Stahl-GFK-Zugproben verglichen. Ziel der Untersuchung ist eine Aussage zur Empfehlung einer günstigen Kombination von Klebstoff und Oberflächenvorbereitung für die handwerkliche Verarbeitung in Laminierwerkstätten. Das schließt Klebstoffe aus, die spezielle Heißhärtvorgänge benötigen oder maschinell dosiert werden müssen, weil beispielsweise die Topfzeit sehr kurz ist oder die Mischanforderungen (bei Mehrkomponentenklebstoffen) manuell nicht erbracht werden können.

Die Versuche nach DIN EN 1465 ermitteln eine Klebfestigkeit  $\tau_b = F/A_{kleb}$ , die keinem Werkstoffkennwert eines bestimmten Klebstoffes entspricht, sondern eine mittlere Spannung darstellt. Die überlagerten Spannungen im Klebstoff sind kombinierte Schub-, Schäl- und Zugspannungen und werden als „Zugscherspannungen“ bezeichnet. Durch das mehr oder weniger ausgeprägte viskoelastische und plastische Verhalten der Klebstoffschicht kommt es zum Abbau extremer Spannungsspitzen (Abb. 4.12).



**Abb. 4.12:** Spannungsverteilung in einschnittig überlappter Verklebung mit elastischem (links) und viskoelastischem Klebstoffverhalten (rechts) [14]

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Die Spannungsverteilung im Klebstoff über die Überlappungslänge ist nichtlinear. Die maximale Spannung im Bruchzustand ist am Rand der Klebschicht um ein Vielfaches höher als die mittlere Spannung. Eine Extrapolation der Bruchkraft auf größere Überlappungslängen führt zu einer Überbewertung der Klebfestigkeit. Zusätzlich zur Standardüberlappungslänge von 12 mm wird eine Serie von Probekörpern mit doppelter Überlappungslänge von 24 mm untersucht.

Nach Empfehlung von HABENICHT [14] sollten einschnittige Proben auch mit doppelter Überlappungslänge geprüft werden, um neben der Bruchfestigkeit auch die Dehnfähigkeit der Klebstoffe beurteilen zu können, denn die Festigkeit der Klebung ist eine Kombination aus Bruchfestigkeit und Dehnvermögen. Das Verformungsvermögen ist von wesentlich größerem Einfluss auf die Festigkeit der Klebung als die Eigenfestigkeit des Klebstoffes selbst. Je geringer der Unterschied in der Klebfestigkeit  $\tau_b$  bei verdoppelter Überlappungslänge ist, um so höher ist die Verformungsfähigkeit.

Unter Ausschluss der Verdrehungen in der Probe durch die Anschlussexzentrizität werden Proben mit sonst gleichen Klebparametern zusätzlich in zweischnittiger Ausführung untersucht. Anhand dieser Proben werden Aussagen zur Schubtragfähigkeit der Klebstoffe möglich. Schälende Spannungskomponenten können durch den Versatz im Kraftfluss dennoch nicht verhindert werden.

Durch Modifikation der Klebstoffe ist man bestrebt, die hohen Spannungsspitzen an den Überlappungsenden von rein elastischen Klebungen durch plastisches Verhalten abzubauen und so einen größeren Bereich der Klebefläche zur Lastabtragung heranzuziehen (Abb. 4.12).

Trotz der Einschränkungen, dass die Klebfestigkeit nur als Mittelwert einer nicht konstanten Beanspruchungsverteilung bestimmt werden kann, kommt dem Versuch eine große Bedeutung zu. Nach HABENICHT [14] eignet sich der Versuch nach DIN EN 1465 [2] besonders für vergleichende Untersuchungen zur Bewertung der Klebfestigkeiten von verschiedenen Klebstoffen und/oder Oberflächenvorbereitungen bei sonst gleichen Randbedingungen der Fügeteile.

##### 4.3.2 Werkstoffe der Fügepartner und Klebstoffe

Das GFK für die Proben ist aus dem in Kap. 4.2.2 beschriebenen Sandwich herausgearbeitet. Dabei wird für eine sichere Probeneinspannung in der Prüfmaschine nur das Decklaminat für die Versuche verwendet. Die Ausrichtung der Proben entspricht der 0°-Richtung des Laminats. Die Proben wurden mit einer präzisen Kreissäge zugeschnitten. Die verklebte Seite ist

#### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben

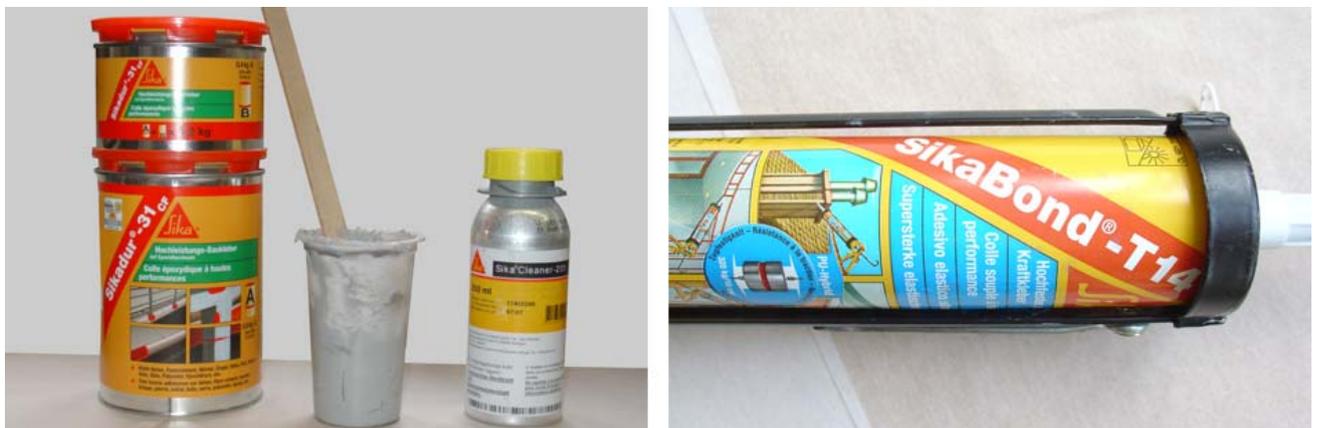
die Außenseite des Sandwiches, deren oberste Schicht aus einem feinen 163 g/m<sup>2</sup> - Gewebe besteht. Das entspricht bei einem handlaminierten Sandwich mit Negativschalung der inneren Abschlusschicht, auf die die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Bleche appliziert werden sollen. Die Dicke des GFK's ergibt sich zu etwa 2 mm. Es ist in Streifen zu 25 mm Breite aufgeschnitten.

Das Blech ist ein Edelstahl 1.4301 mit 1,5 mm Dicke. Es wurde im Laserzuschnitt auf Streifen mit 25 mm Breite gebracht.

Für die Variantenuntersuchung kamen sechs verschiedene Klebstoffe zum Einsatz:

- SI31** Sikadur-31 CF Normal, ein mineralisch gefüllter, steifer, 2K-EP-Bauklebstoff [7] (Abb. 4.13)
- PUR** Sikabond-T14 (PUR), ein 1K-Polyurethan-Bauklebstoff, feuchtigkeitshärtend, hohe Elastizität [5] (Abb. 4.13)
- UP** Laminierharz VIAPAL UP 242 BMT/57 mit verringerter Styrolverdunstung und UP-Härter CUROX M-300 (MEKP), ein mit Celluloseflocken und Glasfaserschnitzel angereichertes 2K-Standardlaminierharz auf Polyesterbasis (Abb. 4.14)
- MA** UHU plus multifest, ein schnellhärtender, hochhaftfähiger, 2K-Methacrylatklebstoff [4] (Abb. 4.14)
- SI330** Sikadur 330 ein ungefüllter, thixotroper 2K-EP-Bauklebstoff [8] (Abb. 4.16)
- DP490** 3M Scotch-Weld DP490, ein zähelastischer 2K-Konstruktionsklebstoff auf Epoxidharzbasis [3] (Abb. 4.15)

Herstellerangaben zu den mechanischen Kennwerten der Klebstoffe sind im Anhang B zusammengestellt. Die Angaben sind für eine Berechnung nicht ausreichend und für den angemischten UP-Klebstoff zunächst nicht vorhanden. In Zugversuchen an Substanzproben (Kap. 4.4) werden fehlende Kennwerte bestimmt.



**Abb. 4.13:** links: Gebinde für Sikadur-31 CF Normal und Sika Cleaner 205, rechts: Sikabond-T14

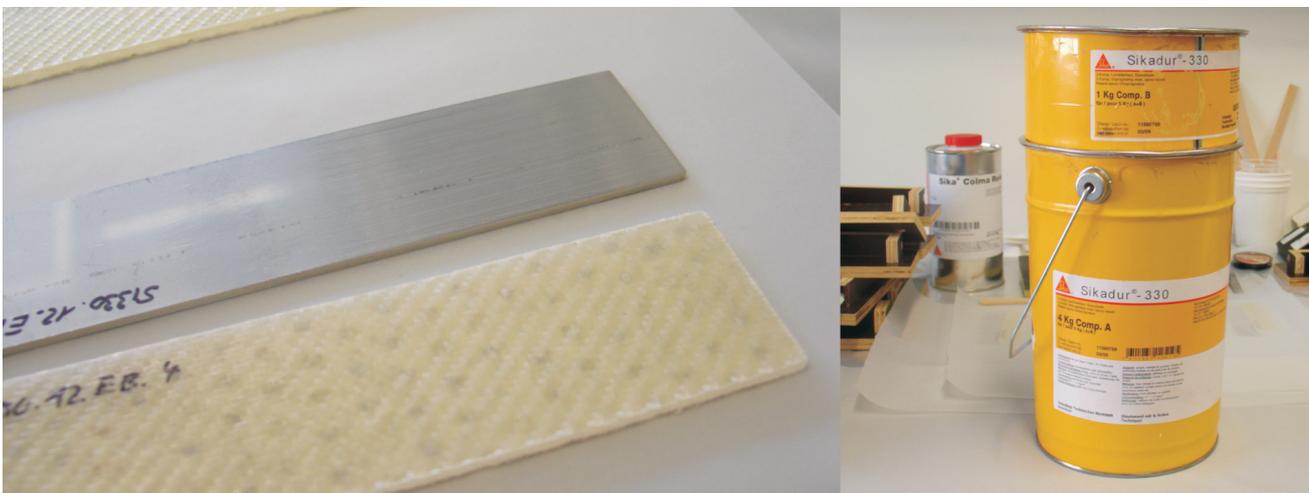
#### 4 Experimentelle Untersuchungen



**Abb. 4.14:** Gebinde für die Klebstoffe - links: gefülltes Laminierharz VIAPAL UP 242 BMT/57, rechts: UHU plus multifest



**Abb. 4.15:** links: 3M Scotch-Weld DP490, rechts: Schleifvlies Scotch Brite 747



**Abb. 4.16:** links: mit Schleifvlies vorbereitete Fügepartner, rechts: Sikadur 330 u. Reiniger Sika Colma

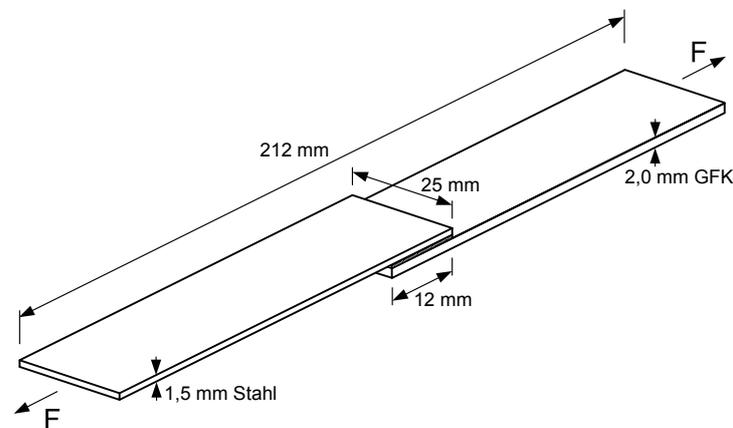
### 4.3.3 Probengeometrie

Die drei Probengeometrien sind in den Bildern (Abb. 4.17, 4.18, 4.19) dargestellt. Die freie Länge der Proben zwischen Klemmbereich und Klebung beträgt 50 mm. Die Klemmlänge selbst misst ebenfalls 50 mm. Die Probenstreifen beider Materialien sind 112 bzw. 124 mm lang und ergeben Gesamtprobenlängen von 212 bzw. 224 mm Länge und Überlappungen von 12 mm bzw. 24 mm.

Die Klebstoffschichtdicke soll möglichst gleichmäßig dünn sein. Sie wurde zu 0,14 - 0,15 mm entsprechend den Herstellerempfehlungen bzw. nach übereinstimmender Meinung anderer Autoren gewählt z.B. [14]. Die Klebstoffschicht endet mit einem abschließenden Ausrundungsradius mit  $r = 0,75$  mm.

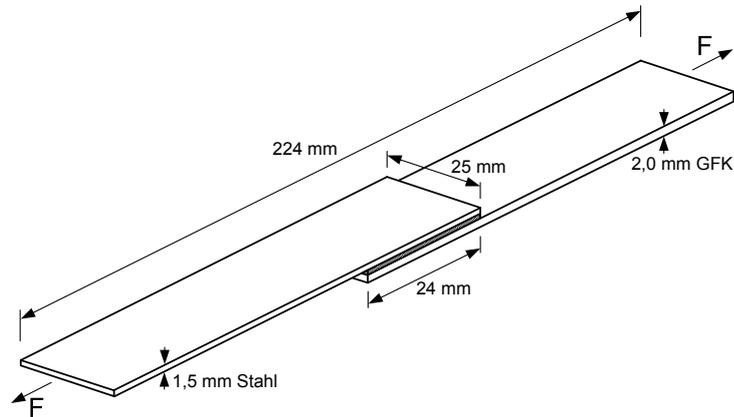
Die Klebeflächen betragen

- einschnittig  $12 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} = 300 \text{ mm}^2$
- zweischnittig  $2 \times 12 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} = 600 \text{ mm}^2$
- einschnittig  $24 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} = 600 \text{ mm}^2$

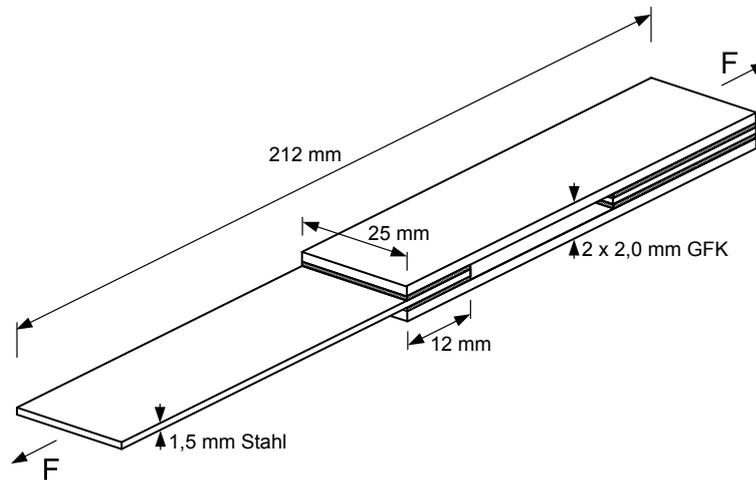


**Abb. 4.17:** Zugscherprobe einschnittig mit 12 mm Klebelänge

## 4 Experimentelle Untersuchungen



**Abb. 4.18:** Zugscherprobe einschnittig mit 24 mm Klebelänge

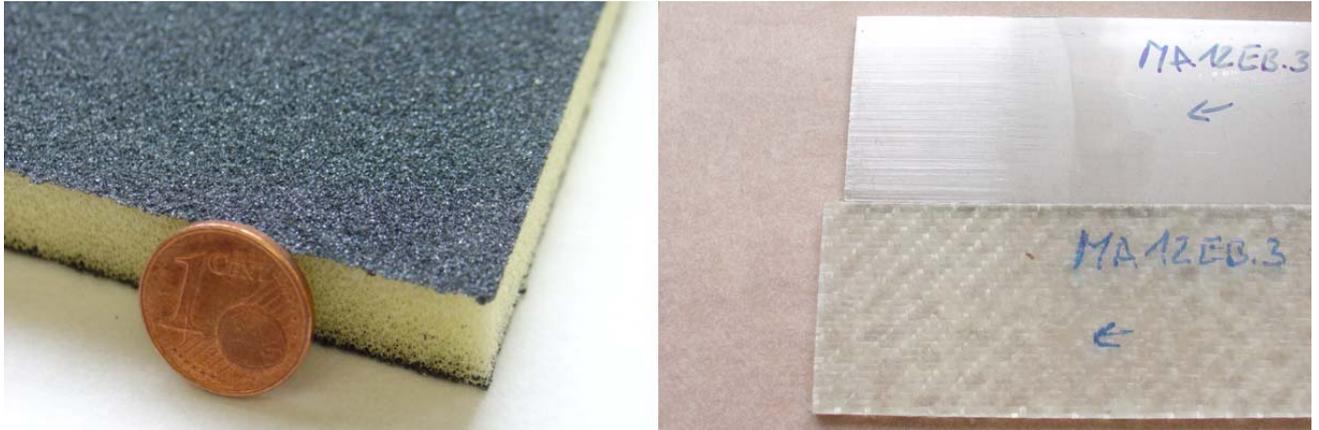


**Abb. 4.19:** Zugscherprobe zweischnittig mit 12 mm Klebelänge

### 4.3.4 Oberflächenvorbereitung

Die Oberflächenvorbereitungen wurden passend zu den Klebstoffen z.T. nach den Angaben der Klebstoffhersteller ausgewählt. Die Sika-Anwenderberatung empfiehlt für die beiden Klebstoffe SI31 und TI14 neben der Entfettung mit organischen Reinigern (Sika Cleaner 205) eine sehr vorsichtige Anrauhung der Oberfläche für beide Fügемaterialien mit einem Scotch Brite Schleifvlies very fine (Abb. 4.20) mit nur einem „Strich“ in Richtung der später aufgebrachtten Kraft. Die angeschliffenen Oberflächen werden unmittelbar vor dem Kleben erneut mit Sika Cleaner 205 bzw. Aceton gereinigt. Für Sikadur 330 wird als Oberflächenvorbereitung ein Druckluftstrahlen mit hartem Strahlmittel und eine Reinigung der Oberflächen mit Sika Colma empfohlen [71]. Für alle Verklebungen mit SI330 werden die Fügeteile mit Sika Colma gereinigt.

#### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben



**Abb. 4.20:** links: Scotch Brite Schleifvliespad very fine, rechts: vorbereitete Oberflächen für Verklebung mit UHU plus multifest

Die Anwenderberatung von Sika empfiehlt zum Erhalt des erzeugten Vorbehandlungszustandes von vorbereiteten Stahloberflächen gerade bei unedlen Stählen die Verwendung eines Primers. Es wird zwar im Rahmen der Coupontests ausschließlich Edelstahl 1.4301 verwendet, dennoch sollte der Einfluss eines Primers auf den Verbund für die spätere Verwendung anderer Stähle mit untersucht werden. Es wird der Sika Tack-Panel Primer verwendet.

Für den Methacrylatklebstoff UHU plus multifest sind nach Angaben des Technischen Merkblattes [4] keine Oberflächenvorbereitungen für beide Werkstoffe notwendig. Es werden die von Sika angegebenen Vorbehandlungsverfahren übernommen, um vergleichbare definierte Ausgangsbedingungen zu erhalten.

In Anlehnung an die Versuche aus (Kap.4.2) und die Versuche von VALLÉE [44] kam außerdem eine Stahlvorbereitung per Sandstrahlen mit niedrigem Strahldruck nach einer ersten Entfettung mit Aceton und einer anschließenden erneuten Behandlung mit Aceton zur Anwendung. Das GFK wurde in den selben Klebeversuchen mit 180-er Sandpapier mit intensivem Strich in mehreren Richtungen zwischen den beiden Reinigungsvorgängen manuell angeschliffen.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.3.5 Probenbezeichnung und Probenumfang

Es wurde eine Probenbezeichnung gewählt, die die Proben ohne zusätzliche Erläuterungen klar charakterisiert. Die Bezeichnung setzt sich zusammen aus:

1. der Abkürzung für den Klebstoff

**SI31** 2K-Epoxidharz Sikadur-31 CF Normal

**PUR** 1K-Polyurethan Sikabond-T14

**MA** 2K-Methacrylat UHU plus multifest

**UP** 2K-Laminierharz aus unges. Polyester mit Füllstoffen

**SI330** 2K-Epoxidharzklebstoff Sikadur 330

**DP490** 2K-Epoxidharzklebstoff 3M Scotch-Weld DP490

2. der Überlappungslänge der Klebung **12** oder **24** mm

3. der Schnittigkeit der Probe **E** - einschnittig oder **Z** - zweischnittig

4. der Art der Oberflächenvorbereitung

**A** Stahl: Aceton, Sandstrahlen, Aceton; GFK: Aceton, 180-er Sandpapier, Aceton

**B** Stahl und GFK: Sika Cleaner 205, Schleifvlies, Sika Cleaner 205

**C** Stahl und GFK: Sika Cleaner 205, Schleifvlies, Sika Cleaner 205, Sika Primer (nur Stahl)

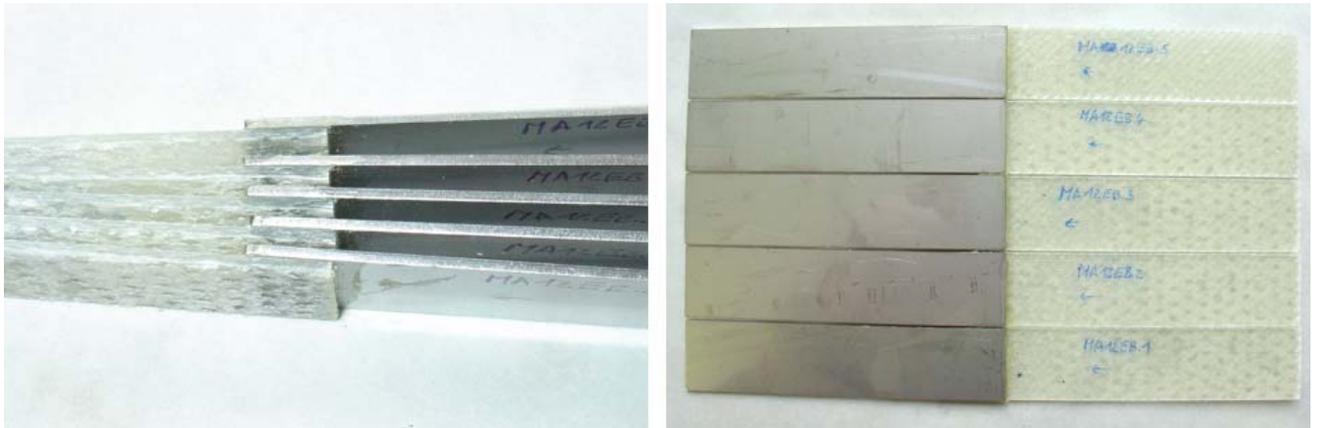
5. der Schäftung der Probe (falls vorhanden)

**S** für eine innenseitige Schäftung der Endkante des verklebten Stahlbleches im Verhältnis 4,2:1 mit verbleibender Blechenddicke von 0,4 mm

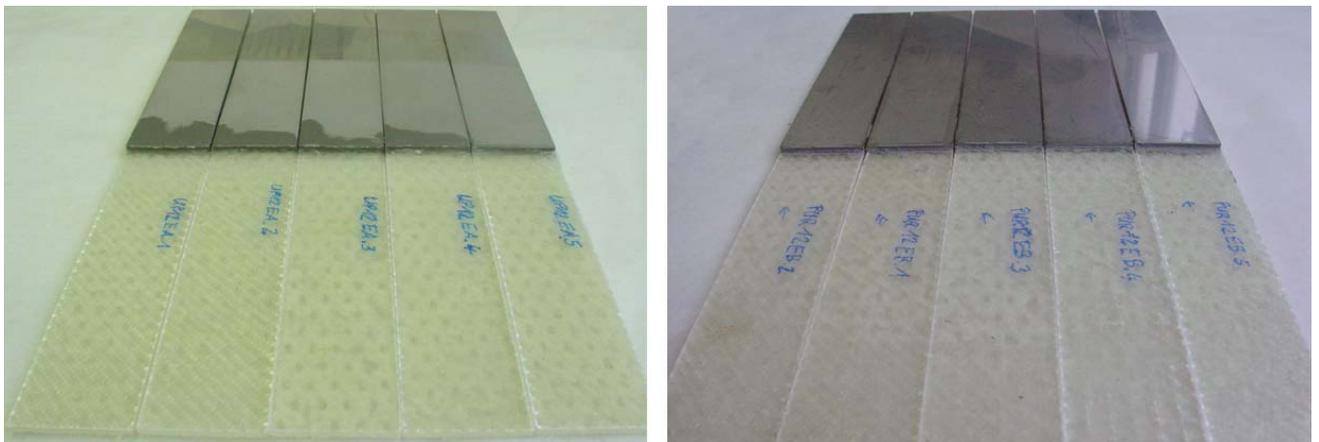
6. der laufenden Nummer der Probe einer Serie **1 - 5**

Die Probenbezeichnung lautet beispielsweise MA 12EB3 (Abb. 4.21) oder UP 12EA5 und PUR 12EB1 (Abb. 4.22). Eine Schäftung wurde nur an der Serie DP490 24EBS als Vergleich zu DP490 24EB untersucht (Tab. 4.4).

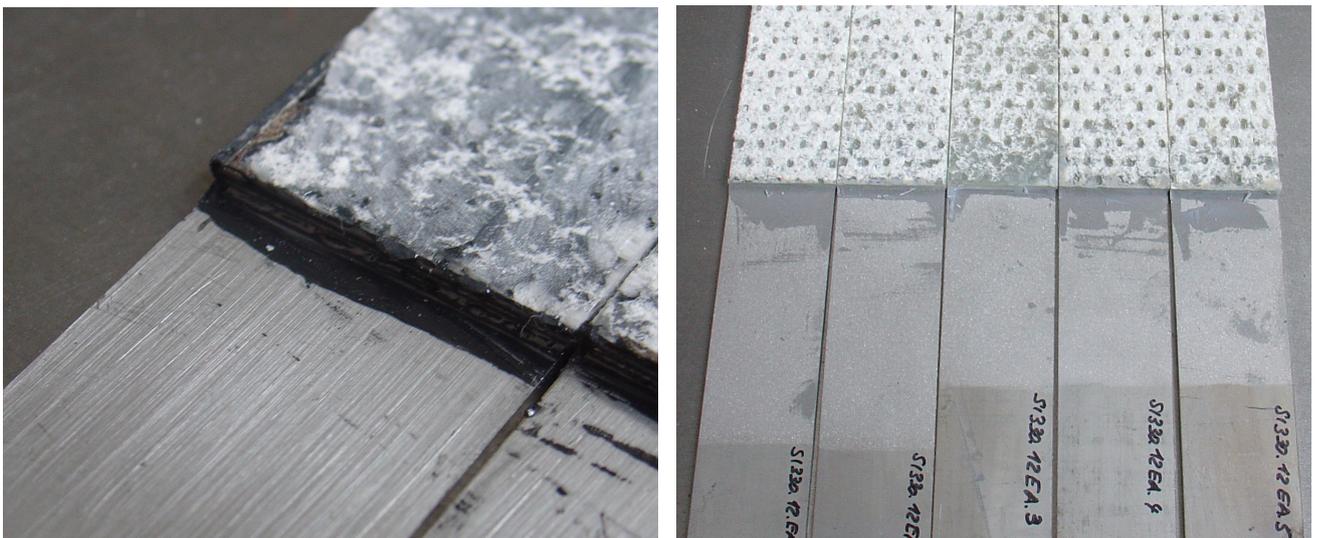
### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben



**Abb. 4.21:** Probekörper der Serie MA12EB



**Abb. 4.22:** links: Probekörper der Serie UP12EA, rechts: PUR12EB



**Abb. 4.23:** links: Detail einer DP490 12EB-Probe, rechts: Probekörper SI330 12EA

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Die Kombination aus sechs Klebstoffen, drei Oberflächenvorbereitungen sowie drei Proben-geometrien und mehreren Prüfkörpern je Serie lassen die Probenanzahl schnell anwach-sen. Es wurde versucht, sinnvolle Kombinationen herauszusuchen, um ein möglichst breites Feld der Parameter abzudecken, aber gleichzeitig den Prüfumfang zu begrenzen. Das Prüf-programm der Coupontests kann Tabelle 4.4 entnommen werden. Für alle 12 mm überlapp-ten Proben wurden je Serie fünf Probekörper gefertigt. Die einschnittigen Proben mit 24 mm Überlappungslänge erhielten je Serie drei bzw. fünf Probekörper.

Der Gesamtprobenumfang beläuft sich auf 125 Proben.

	SI31	PUR	UP	MA	SI330	DP490
12EA			5		5	
12EB	5	5	5	5	5	5
12EC	5	5	5			
24EA			3		5	
24EB				3		5
24EBS						5
24EC	3	3	3			
12ZA			5			
12ZB	5	5	5	5		
12ZC	5	5	5			

**Tabelle 4.4:** Zugscherversuche-Probenmatrix

##### 4.3.6 Probenherstellung und Handhabung der Klebstoffe

Die Klebungen wurden unter Laborbedingungen bei Raumtemperatur hergestellt. Für die einzelnen Probengeometrien wurden Klebelehren gefertigt. Sämtliche Arbeiten wurden ausschließlich unter Verwendung von Schutzhandschuhen ausgeführt, um die Klebeflächen nie direkt mit den Fingern zu berühren. Nach dem Vermessen aller Geometriedaten per digitalem Messschieber (Genauigkeit 0,01 mm) und der Oberflächenvorbereitung wurde der Klebstoff aufgetragen, die Proben in die Lehren eingebaut und mit Massestücken für die nötige Anpresskraft belastet (Abb. 4.24). Die Aushärtung erfolgte zunächst bei Raumtemperatur. Die geklebten Proben wurden nach 2 Tagen bei 60°C im Temperofen über 8 h nachgehärtet. Die Zugscherproben mit DP490 wurden nach Herstellerempfehlung unmittel-bar nach dem Fügen in 2 h bei 60°C ausgehärtet.

### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben

Um die Klebstoffschichtdicke zuverlässig zu erreichen, wurden in die Fugen je zwei Stücke von 0,14 mm dünnem Nylonfaden eingelegt. Bereits unter geringen Anpressdrücken stellte sich durch Entweichen überschüssiger Klebstoffsubstanz die gewünschte Fugenstärke ein. Die Klebschichtstärken wurden über 0,01 mm genaue Dickenmessungen an je drei Stellen im Klebebereich der Fügeiteile und anschließend an der geklebten Gesamtprüfkörperdicke überprüft.

Die Übergangsradien an den Enden der Klebstoffschicht werden zu 0,75 mm gewählt, sodass sie sich mit einem Federdraht auch in den Fugen der zweiseitigen Proben innerhalb der Topfzeit der Klebstoffe ausbilden lassen. Die Größe der Übergangsradien spielen nach VALLÉE [72, 73] keine wesentliche Rolle, solange sie überhaupt ausgebildet werden (Abb. 4.24).



**Abb. 4.24:** Ausbildung der Übergangsradien an einem zweiseitigen Prüfkörper mit  $r = 0,75$  mm

Die praktische Verarbeitbarkeit der Klebstoffe war unterschiedlich. Der *UHU plus multifest* wird aus einer sehr leicht handhabbaren Doppelkammerkartusche mit statischem Zwangsmischer und mit einer Austragsspritze (Abb. 4.14) dosiert. Andere manuelle Misch- und Auftragsverfahren sind bei der kurzen Topfzeit von ca. 4 min auch nicht denkbar. Die Doppelkartusche verhindert eine Fehldosierung und der statische Zwangsmischer garantiert gleichmäßige Durchmischung. Der Klebstoff haftet gut, ohne abzulaufen. Wegen des hohen Schwindmaßes sollte mit möglichst dünnen Klebschichtdicken gearbeitet werden. Die kurze Topfzeit erhöht zwangsweise den Bedarf an Mischröhrchen. Vorteilhaft für den Arbeitsfortschritt ist das Erreichen von 75% der max. Klebfestigkeit nach 10-15 min bei Raumtemperatur [4]. Bei der Verarbeitung muss für gute Arbeitsplatzbelüftung gesorgt oder eine Atemschutzmaske verwendet werden. Grundsätzlich ist Atemschutz bei der Verwendung aller Klebstoffe und der lösungsmittelhaltigen Reiniger zu empfehlen.

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Der *Sikabond-T14* wird in 300 ml - Kartuschen geliefert und mit „Silikonspritzen“ dosiert. Die Handhabung ist einfach. Der Klebstoff haftet gut. Die Füge­teile müssen fixiert werden um mit etwa 4 mm/ 24 h langsam durchhärten zu können. Wichtig für großflächige Klebungen von diffusionsdichten Werkstoffen ist allerdings, dass der Klebstoff in Raupen oder zumindest mit dem Zahnpachtel aufgetragen wird, damit die zum Abbinden nötige Luftfeuchtigkeit den Klebstoff auch erreicht. Für den Sikabond-T14 wird laut [5] eine Oberflächenvorbereitung mit Schleifvlies und Haftreiniger für Stähle und der SikaTack-Panel Primer für poröse Untergründe empfohlen.

Der *Sikadur-31 CF Normal* muss, wenn nicht beide Gebinde A + B im Ganzen gemischt werden, zunächst mit einer Waage präzise aus beiden Komponenten eingewogen werden. Die Mischung soll intensiv, aber ohne nennenswerten Luft­eintrag erfolgen. An gleichmäßiger Farbe erkennt man die ausreichende Durchmischung der unterschiedlich gefärbten Ausgangskomponenten. Der Klebstoff ist mit Quarzsand gefüllt und besitzt eine sichtbare Körnung. Die pastöse Klebstoffmasse lässt sich sehr gut auftragen und verteilen. Der EP-Klebstoff härtet schwundarm aus.

Der selbstgemischte *UP-Klebstoff* aus flüssigem Laminierharz besitzt mit den zugegebenen Celluloseflocken und Glasfasern einen thixotropen Charakter, erreicht aber nicht die Pastösität des SI31. Beim Anpressen der Füge­teile ist ein Ausdrücken des flüssigen Harzes zu beobachten. Es sollten bei der Verwendung eines selbst erstellten Klebstoffes auch andere Füllstoffe probiert werden. Statt der Cellulosefasern könnte für ein pastöses Verhalten amorphes SiO<sub>2</sub> untergemischt werden. Es besitzt eine besondere Feinheit und ist in geringen Mengen hoch wirksam. Der Haftverbund zum Füllstoff ist grundsätzlich besser als bei Celluloseflocken. Die Glasfasern sollen kürzer als 2 mm sein. Man erreicht eine bessere Durchmischung gegenüber längeren Fasern, vermindert ein Ausrichten in der Klebefuge und die Ausbildung undurchtränkter Stränge. Es stehen auch gemahlene Glasfasern zur Verfügung, die gegenüber geschnittenen nicht mehr als Strangstücke eingemischt werden und sich deshalb besser benetzen lassen. Die Topfzeit ist mit 15 - 20 min als kurz einzustufen, wenn man bedenkt, dass Harz, Härter und Füllstoffe zunächst manuell gemischt werden müssen.

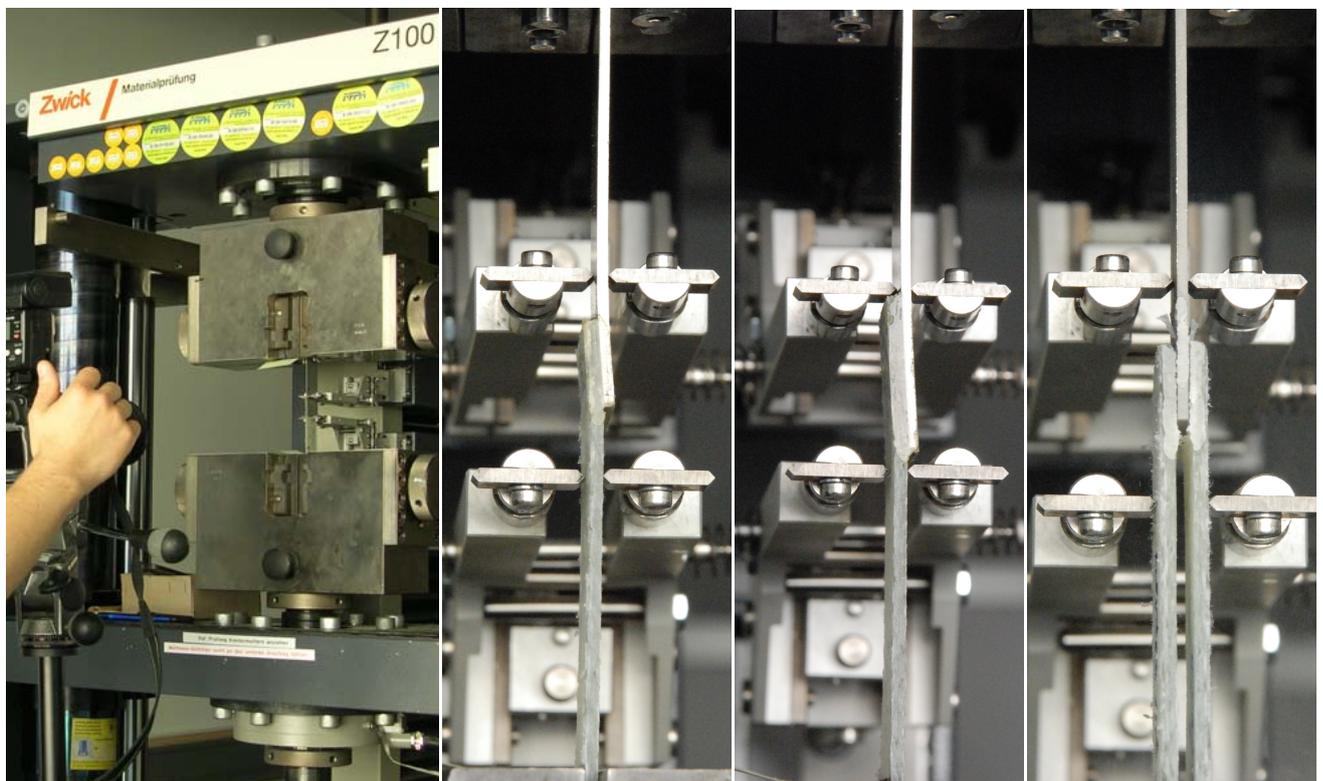
Der *Sikadur-330* wird als thixotropes Imprägnierharz vertrieben und in großen Gebinden geliefert. Die Komponenten A + B des Klebstoffs müssen zunächst mit einer Waage präzise eingewogen und anschließend intensiv und ohne Luftblaseneintrag gemischt werden. Der Auftrag auf die Klebefläche erfolgt z.B. mit Spachteln. Die Topfzeit ist wie bei allen Klebstoffen temperaturabhängig und wird vom Hersteller mit 90 min bei 10°C und bis 30 min bei 35°C angegeben. Die Aushärtung erfolgt ebenso temperaturabhängig. Bei 23°C härtet der

### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben

Klebstoff in 24 h durch. Durch die Thixotropie läßt sich der Klebstoff gut durchmischen und haftet tropffrei auf allen Flächen auch über Kopf.

Der *3M Scotch-Weld DP490* wird in einfach handhabbaren Doppelkammerkartuschen mit statischem Zwangsmischer geliefert. Der schwarze Klebstoff hat eine lange Topfzeit von 90 min, so dass ohne Zeitdruck gearbeitet werden kann und bei kontinuierlichem Arbeitsfortschritt das statische Mischrohr nicht ersetzt werden muss. Der Klebstoff haftet sehr gut auf allen Oberflächen, ist pastös und noch fließfreudiger als der SI330. Bei größeren Klebflächen kann überschüssige Klebstoffmasse leicht herausgedrückt werden. Allerdings muss die Fixiervorrichtung für die Fügeteile vorsichtig angesetzt werden, weil die Fügeteile leicht auf dem Klebstoff verrutschen können. Der Klebstoff härtet bei Raumtemperatur. Die verklebten Teile sind nach 4 - 6 h weiterverarbeitbar. Die Endfestigkeit wird dann nach mehreren Tagen erreicht. Laut Herstellerangaben kann nach einer Härtung über 24 h bei Raumtemperatur mit anschließender Temperung bei 80°C für 1 h die Endfestigkeit erreicht werden. Die höchsten Festigkeitswerte werden bei sofortiger Temperung über 2 h der noch weichen Klebstoffmasse bei 65°C in Aussicht gestellt.

#### 4.3.7 Versuchsdurchführung



**Abb. 4.25:** links: Zugscherversuche an einer Zwick Z100 der MFGPA Weimar, rechts: Probekörper unmittelbar vor (MA12EB2, MA24EB2) bzw. im Versagungszustand (UP12ZA5)

## 4 Experimentelle Untersuchungen

Die Zugscherversuche wurden an der MFPA Weimar durchgeführt. Die Prüfmaschine ist eine Zwick Z100 (Abb. 4.25). Die Dehnungen wurden mit dem Multisens, einem Extensometer, gemessen. Der Multisens wurde symmetrisch oberhalb und unterhalb der Klebung angesetzt. Die Messlänge orientierte sich dabei an den Proben mit 24 mm Überlappungslänge und wurde für alle Proben auf 28 mm festgelegt.

Das Prüf- und Probenlagerklima entspricht mit 23°C und 50 % r. L. F. dem Normklima. Zwischen Probenherstellung und Prüfung lagen zwei Monate. Die Prüfungsgeschwindigkeit wurde einheitlich so gewählt, dass sie den Vorgaben der DIN EN 1465 [2] entspricht. Um eine Prüfdauer von  $65 \pm 20$  s zu erhalten, werden die traversenweggesteuerten Prüfungen mit 1 mm/min gefahren. Die Vorkraft von 20 N geht in die Auswertung mit ein.

### 4.3.8 Versuchsergebnisse

Von den drei gewählten Oberflächenvorbereitungen können die geprimerten Stahloberflächen (C) gegenüber den ungeprimerten nicht überzeugen. Die Bruchkräfte dieser Zugscherproben sind durchweg geringer und streuen in einem größeren Bereich als vergleichbare ungeprimerte Klebproben. Der Primer stellt für die harten, steifen Klebungen (MA, SI31, UP) eine Schwachstelle in der Fuge dar und es ist ausschließlich Adhäsionsversagen (AF) zwischen Primer und Stahl zu beobachten. Anders verhält es sich bei den elastisch geklebten Proben (PUR). Die Haftung des Primers ist in diesen Fällen besser als die Eigenfestigkeit des Klebstoffes und zeigt keinen sichtbaren Einfluss auf das Ergebnis. Bei den Auswertungen zu den härtesten Klebstoffen werden die geprimerten Proben nicht weiter berücksichtigt.

Die Versuchsergebnisse zeigen geringe Streuungen für den elastischen Polyurethan-Klebstoff. Das Bruchverhalten kann als duktil bezeichnet werden. Die  $F-\Delta L$ -Kurven zeigen ein Kraftmaximum mit anschließendem allmählichen Kraftabfall (Abb. 4.27 - 4.29). Die absoluten Bruchkräfte sind erwartungsgemäß gering. Die Bruchart kann nach Kap. 2.9.5 durchweg als substratnaher Kohäsionsbruch (SCF) auf der GFK-Seite bezeichnet werden (Abb. 4.34). Durch das hohe Dehnvermögen eignet sich der Sikabond-T14, bei entsprechender Schichtstärke, für großflächige Verklebungen ohne Ausbildung extremer Spannungsspitzen, sodass z.B. Unterschiede im Temperaturdehnungsverhalten von Fügepartnern unproblematisch bleiben. Belegt wird diese Aussage durch die auf nur 86,2% verringerte Klebfestigkeit bei Verdopplung der Überlappungslänge für die Serien PUR12EC und PUR24EC (Tab. 4.5). Für kleinflächige Verklebungen wie in Kap. 3 vorgeschlagen sind diese Art von Klebstoffen nicht geeignet.

### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben

Nach Ausschluss der Proben mit Oberflächenvorbereitung C (siehe 1. Absatz) sind die verbleibenden mit SI31 geklebten Proben nur als Typ B ausgeführt. Als Versagensform tritt bei den einschnittigen Proben Adhäsionsversagen (AF) am GFK auf (Abb. 4.30). Bei den zweischnittigen Ausführungen kann bei drei Proben ein Delaminierbruch (DF) der äußeren Glasgewebelage in Verbindung mit einer hohen Bruchkraft (8,8-9,8 kN), aber auch zwei Proben mit einem Adhäsionsversagen (AF) an der Stahloberfläche und deutlich verringerter Bruchkraft (4,9 - 5,0 kN) beobachtet werden.

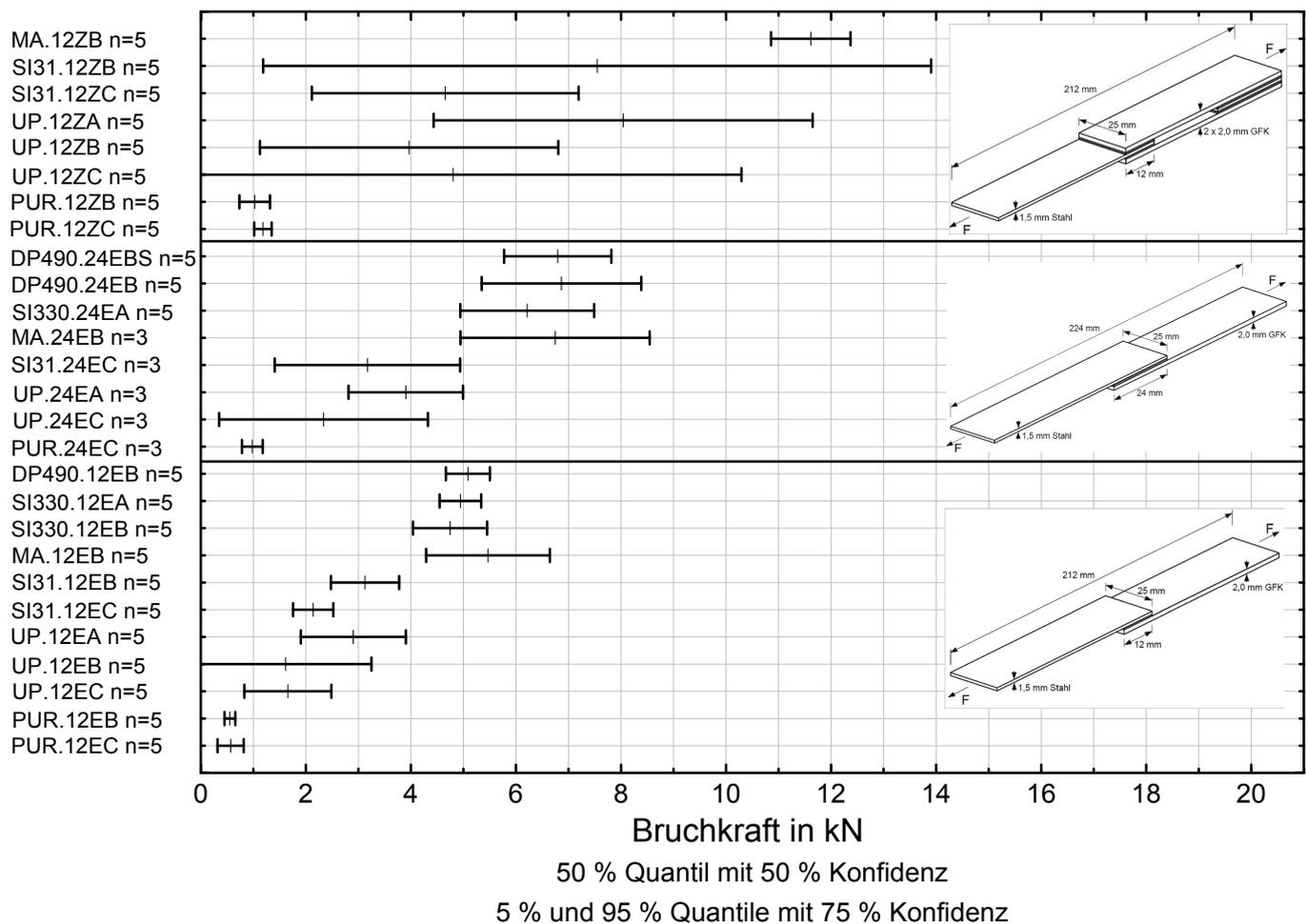
Die mit UP-Klebstoff gefügten Teile zeigen mit der Oberflächenvorbereitung Typ A (Sandstrahlen) gegenüber Typ B (Schleifvlies) höhere Bruchkräfte bei geringerer Streuung, sodass auch für die SI31-Verklebungen mit mehr Oberflächenrauheit am Stahl bessere Ergebnisse erwartet werden.

Neben dem gefüllten Sikadur-31 CF sind der hochgefüllte Sikadur-30 und der ungefüllte reine EP-Klebstoff Sikadur-330 erhältlich. VALLÉE macht in [44] sehr positive Erfahrungen beim Verkleben von pultrudierten GFK mit Sikadur-330 und ausschließlich Versagen der angestrebten Form DF. Das Datenblatt des Sikadur-31 CF [7] empfiehlt für Stahloberflächen den Vorbereitungsgrad Sa 2 $\frac{1}{2}$  durch Sandstrahlen. Nach den Erkenntnissen zu den mechanischen Kennwerten (Kap. 4.4) wurde auf weitere Versuche mit den gefüllten Sikadur-Klebstoffen verzichtet und nur mit Sikadur-330 und sowohl gestrahlten als auch angeschliffenen Oberflächen Zugscherversuche durchgeführt. Dabei konnte mit den aufgeklebten sandgestrahlten Blechen eine geringe Laststeigerung bei verringerter Streuung gegenüber den angeschliffenen Blechen erreicht werden (Abb. 4.26). Im direkten Vergleich ist der Sikadur-330 gegenüber dem Sikadur-31 CF durch höhere Tragfähigkeit bei geringerer Eigensteifigkeit der geeignetere Klebstoff.

Die mit UP geklebten Proben versagen ausschließlich durch Adhäsionsbruch (AF) an der Stahloberfläche für beide Oberflächenvorbereitungen A und B (Abb. 4.34), wobei die absoluten Bruchkräfte bei den sandgestrahlten Stahloberflächen etwa doppelt so hoch sind. Die Streuung der Bruchkräfte ist, typisch für AF-Versagen, sehr hoch. Ein unzureichender adhäsiver Haftverbund ist der entscheidende Grund, einen Klebstoff nicht zu verwenden. Der weniger steife UP-Klebstoff erreicht mit Oberfläche A Bruchkräfte auf dem Niveau des SI31 mit Oberfläche B. Die Verdopplung der Klebelänge von Serie UP12EA zu UP24EA verringert die Klebfestigkeit auf 67,1 % (Tab. 4.5). Gemessen an den leistungsstärksten Klebstoffen in diesem Vergleich (SI330, MA und DP490) kann das modifizierte UP-Laminierharz insgesamt nicht überzeugen.

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Der Methacrylatklebstoff zeigt beste adhäsive Hafteigenschaften. Die Bruchkräfte der ausschließlich nach Typ B vorbereiteten Proben liegen in diesem Vergleich auf höchstem Niveau und streuen in einem schmalen Band (Abb. 4.26). Als Versagensformen werden fast ausschließlich Delaminationsbrüche (DF) der obersten Glasgewebeschiicht angetroffen (Abb. 4.30). Bei den zweischnittigen Proben kommt der 1,5 mm dicke Edelstahl bereits in den Bereich plastischer Spannungen (vgl. Abb.(4.43). Beim höchsten Einzelwert der Bruchkraft von 11,96 kN entspricht das einer rechnerischen Stahlnormalspannung von  $323 \text{ N/mm}^2$ , zusätzlich wirken Biegespannungen, die insgesamt zu plastischen Verformungen im Blech führen. Bei Verdopplung der Überlappungslänge geht die rechnerische Klebfestigkeit auf 61,7% zurück.



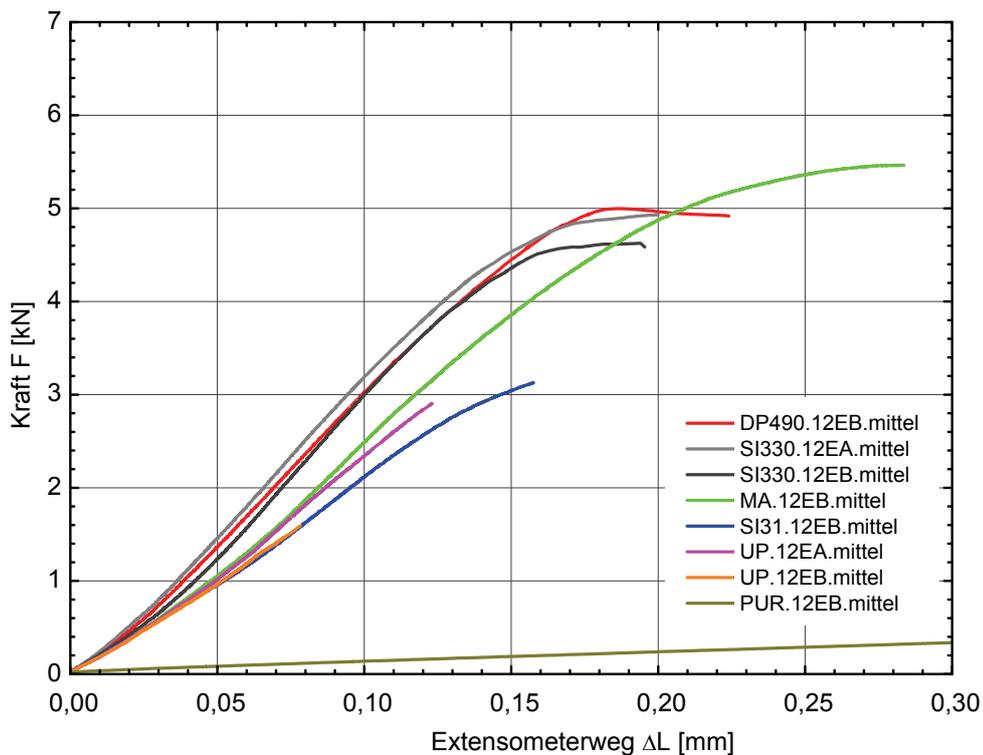
**Abb. 4.26:** Experimentell ermittelte Bruchkräfte an geklebten Zugscherproben

Der zähelastische EP-Klebstoff 3M Scotch-Weld DP490 erzeugt gleichmäßige Bruchbilder bei geringer Streuung der Bruchkraft. Den Vorteil einer höheren Eigenfestigkeit (Kap. 4.4) gegenüber den anderen Klebstoffen kann man in der Anwendung nicht nutzen, da nicht

### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben

der Klebstoff, sondern das UP-Harz im Laminat den Schwachpunkt in der Verbindung darstellt. Für das Verkleben schafft dieser Zustand allerdings Vertrauen. Den zuverlässigen Verbund beider Fügmaterialien erreicht man mit einfachen Oberflächenvorbereitungen (Aceton und leichter Anschliff). Die rechnerische Klebfestigkeit geht bei Verdopplung der Überlappungslänge auf 67,5% zurück. Bei 24 mm Überlappung verringerte eine innenliegende Schäftung des Stahlbleches den Mittelwert der Bruchkraft um 1,0%, allerdings ging die Streuung der Bruchwerte zurück und der für eine Bemessung verwendete 5% - Quantilwert ließ sich mit der Schäftung um 8,0% steigern.

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich Empfehlungen für die Verklebung von Edelstahl und GFK ableiten. Für hochbelastete Strukturverklebungen von kompakten Stahlteilen mit GFK eignen sich von den untersuchten Klebstoffen besonders der UHU plus multifest, Sikadur-330 und 3M Scotch-Weld DP490 mit vergleichbaren Bruchkennwerten. Bezieht man das Handling der Klebstoffe mit ein, fällt die erste Wahl auf den DP490. Positiv zu werten ist das einfache Dosiersystem, die lange Topfzeit, die hohe Festigkeit, das zuverlässige Bruchbild, die geringe Schrumpfung und die Fließfähigkeit bei besten Hafteigenschaften.



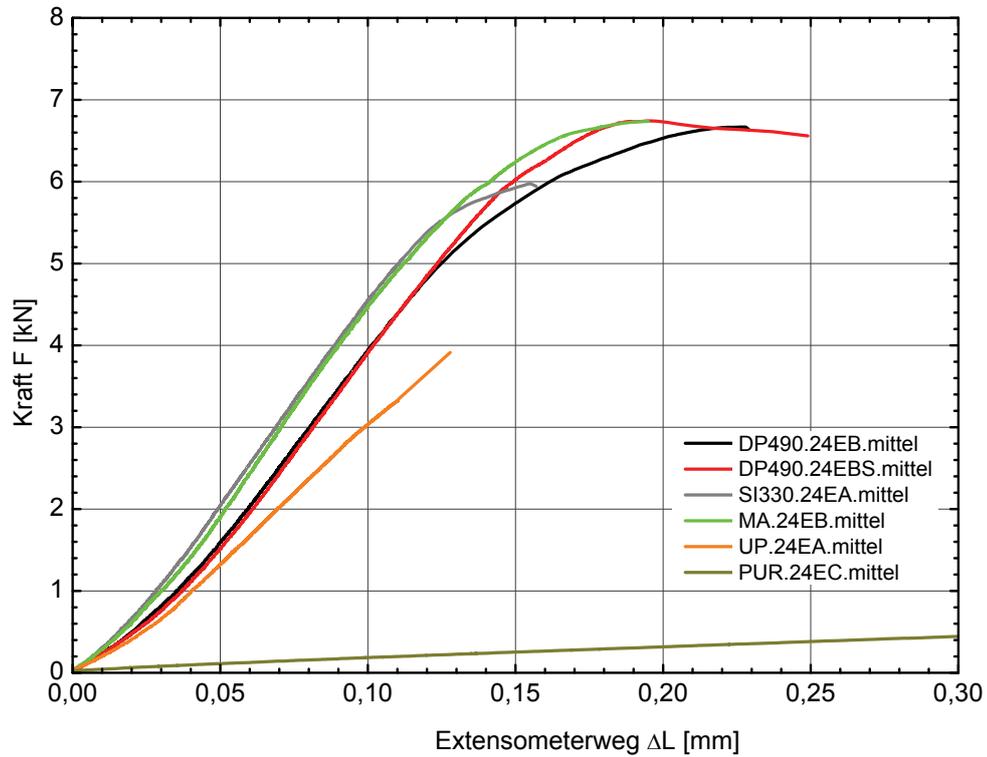
**Abb. 4.27:** Kraft-Weg-Diagramm der einschnittigen Proben mit 12 mm Klebelänge bei  $L_0 = 28$  mm

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

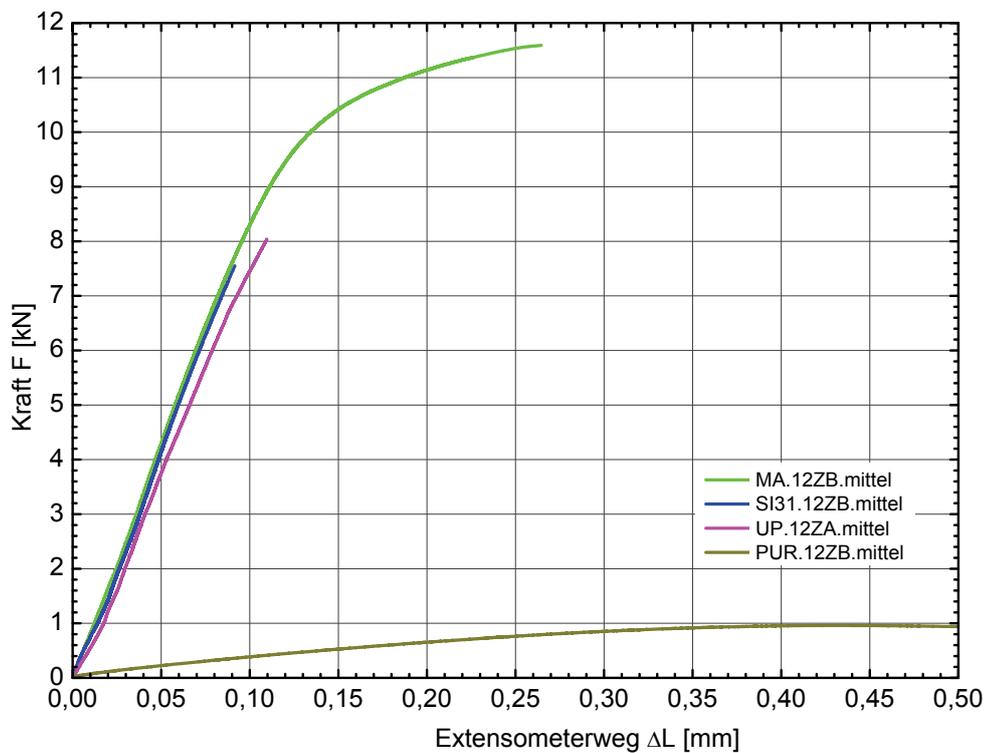
Serie	Anz.	5 %	50 %	95 %	$A_{kleb}$	$\tau_b = F/A$	Bruch
12 mm einschnittige Überlappung							
PUR.12EC	5	318	567	816	300	1,89	SCF <sub>GFK</sub>
PUR.12EB	5	451	553	656	300	1,84	SCF <sub>GFK</sub>
UP.12EC	5	829	1658	2486	300	5,53	AF <sub>Stahl</sub>
UP.12EB	5	0	1616	3249	300	5,39	AF <sub>Stahl</sub>
UP.12EA	5	1904	2904	3904	300	9,68	AF <sub>Stahl</sub>
SI31.12EC	5	1758	2141	2525	300	7,14	AF <sub>Stahl</sub>
SI31.12EB	5	2478	3128	3777	300	10,43	AF <sub>GFK+Stahl</sub>
MA.12EB	5	4290	5468	6647	300	18,23	SCF-DF <sub>GFK</sub>
SI330.12EB	5	4041	4746	5451	300	15,82	3xCSF,1xDF,1xSCF <sub>GFK</sub>
SI330.12EA	5	4547	4943	5339	300	16,48	AF <sub>Stahl</sub> , CSF <sub>GFK</sub>
DP490.12EB	5	4667	5086	5504	300	16,95	CSF-DF <sub>GFK</sub>
24 mm einschnittige Überlappung							
PUR.24EC	3	782	981	1179	600	1,63	SCF <sub>GFK</sub>
UP.24EC	3	349	2336	4324	600	3,89	AF <sub>Stahl</sub>
UP.24EA	3	2812	3903	4993	600	6,50	AF <sub>Stahl</sub>
SI31.24EC	3	1407	3172	4937	600	5,29	AF <sub>Stahl</sub>
MA.24EB	3	4944	6745	8546	600	11,24	DF <sub>GFK</sub>
SI330.24EA	5	4940	6214	7489	600	10,36	AF <sub>Stahl</sub> , CSF+DF <sub>GFK</sub>
DP490.24EB	5	5347	6866	8384	600	11,44	DF <sub>GFK</sub>
DP490.24EBS	5	5775	6796	7817	600	11,33	DF <sub>GFK</sub>
12 mm zweischnittige Überlappung							
PUR.12ZC	5	1017	1183	1348	600	1,97	SCF <sub>GFK</sub>
PUR.12ZB	5	736	1027	1317	600	1,71	SCF <sub>GFK</sub>
UP.12ZC	5	0	4804	10294	600	8,01	AF <sub>Stahl</sub>
UP.12ZB	5	1125	3966	6807	600	6,61	AF <sub>Stahl</sub>
UP.12ZA	5	4433	8040	11648	600	13,40	AF <sub>Stahl</sub>
SI31.12ZC	5	2115	4654	7193	600	7,76	AF <sub>Stahl</sub>
SI31.12ZB	5	1186	7545	13904	600	12,58	3xDF, 2xAF <sub>Stahl</sub>
MA.12ZB	5	10858	11613	12369	600	19,36	DF <sub>GFK</sub>

**Tabelle 4.5:** Zugscherversuche - Quantile der Bruchkräfte F bei 75 % Konfidenz, Klebefläche A, Klebfestigkeit  $\tau_b$  nach DIN EN 1465 [2] [N, mm<sup>2</sup>, N/mm<sup>2</sup>] und Versagensform nach DIN EN ISO 10365 [49]

### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben



**Abb. 4.28:** Kraft-Weg-Diagramm der einschnittigen Proben mit 24 mm Klebelänge bei  $L_0 = 28$  mm



**Abb. 4.29:** Kraft-Weg-Diagramm der zweischnittigen Proben mit 12 mm Klebelänge bei  $L_0 = 28$  mm

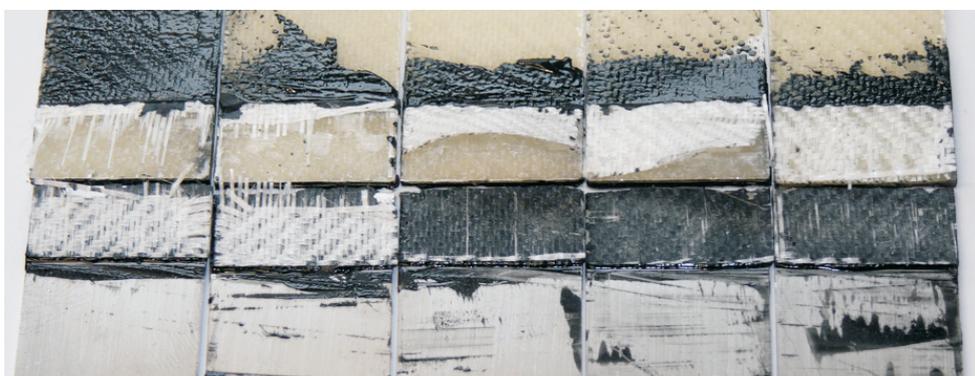
#### 4 Experimentelle Untersuchungen



**Abb. 4.30:** typische Bruchbilder links: MA-Verklebungen, rechts: SI31-Verklebungen

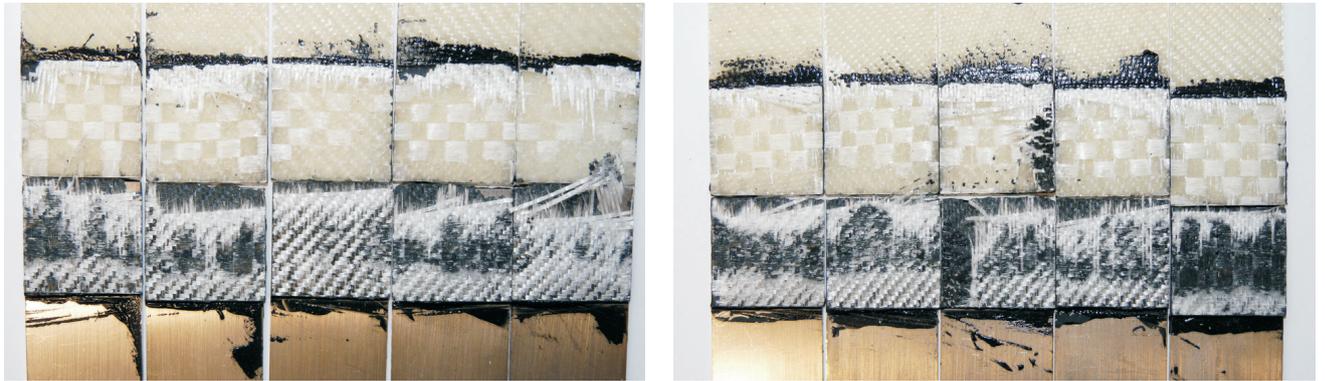


**Abb. 4.31:** Bruchbilder links: SI330 12EA, rechts: SI330 12EB

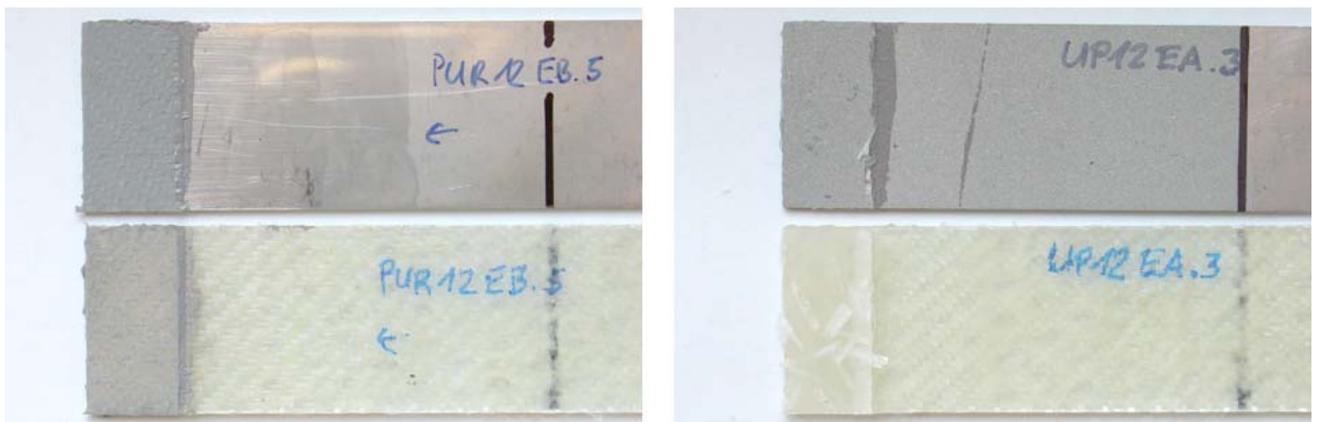


**Abb. 4.32:** Bruchbilder DP490-12EB

### 4.3 Zugscherversuche an geklebten Stahl-GFK-Proben



**Abb. 4.33:** Bruchbilder links: DP490 24EB, rechts: DP490 24EBS



**Abb. 4.34:** typische Bruchbilder links: PUR-Verklebungen, rechts: UP-Verklebungen

## 4.4 Zugversuche an Substanzproben

### 4.4.1 Vorbemerkungen

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls für die Materialien der Klebstoffe und Füge­teile ist für die Modellierung der Steifigkeitsverhältnisse in vergleichenden Berechnungen in ANSYS® erforderlich. Ebenso sind die nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für die spätere Berechnung von hohem Interesse. Die Untersuchungen werden an reinen Werkstoffproben, den sogenannten Substanzproben, in Anlehnung an folgende Normen durchgeführt:

- DIN EN ISO 527-2 [74] für die Klebstoffe
- DIN EN ISO 527-4 [75] für das GFK

Während die Technischen Merkblätter für einige Klebstoffe mechanische Werkstoff­kenngrößen zur Verfügung stellen [7, 6, 8, 3], sind für andere Klebstoffe [4, 5, 76] einschließlich des selbst gemischten UP-Klebstoffes keine Angaben verfügbar. Laut der Sika-Anwenderberatung unterscheiden sich die Klebstoffe Sikadur-30 und Sikadur-31 CF Normal nicht wesentlich voneinander. In den Technischen Merkblättern differieren aber die Angaben zum E-Modul um eine Größenordnung. Die Tabellen 4.6, 4.7 und Anhang B geben einen Überblick zu den Werkstoffkenngrößen nach Literaturangaben für die betrachteten Klebstoffe und die Materialien der Füge­teile. Die Vergleichsmöglichkeit zu bereits bekannten Kenngrößen ermöglicht eine Kontrolle der Prüfergebnisse und sichert die Aussagequalität für die Werkstoffe ohne Literaturangaben.

Der Klebstoff DP490 von 3M bewährte sich in umfangreichen Untersuchungen von PETERS in [18] für GFK-Glas-Verklebungen. Er zeigte „praktisch keine Abhängigkeit von der natürlichen Alterung“ (2% Abfall der Klebzugfestigkeit nach 24 Monaten Freibewitterung). Unter intensiver künstlicher Alterung (9 Wochen) erreichten die Verklebungen nur noch 50% der Kurzzeitfestigkeit, was aber auch dem weit unter der Klebstofffestigkeit versagendem GFK (Pultrusionsprofil) zuzuschreiben ist. Die hohe UV-Belastung, die durch die Glasscheiben ungehindert an die Verklebung gelangen konnte, wird in einer Stahl-GFK-Verklebung, die vorrangig bei Hüllkonstruktionen auf der sonnenabgewandten Innenseite der Konstruktion liegt, einen viel geringeren Einfluss haben. In zweiwöchigen Kriechversuchen an Klebstoff­schulterstäben konnten 50% der Kurzzeitfestigkeit (18,71 MPa) ohne nennenswerte Kriechneigung ertragen werden. Unter 75% Lastniveau (28,07 MPa) erfolgte ein Bruch nach 200 h bei 15% Dehnung. Unter verschiedenen Temperaturniveaus (-20°C und +80°C) erreichten die Glas-GFK-Verklebungen gleiche Zugbruchfestigkeiten. Der Bruch trat dabei ausschließlich im GFK auf, sodass der Klebstoff unter den verschiedenen Umwelteinflüssen

immer besser als das Fügmaterial GFK ist.

Der Elastizitätsmodul von ein und demselben Klebstoff ist stark abhängig von verschiedenen Randbedingungen. Nach HABENICHT [14] beeinflusst die Einsatztemperatur den E-Modul je nachdem, wie nah sie an der Glasübergangstemperatur liegt. Für Epoxide liegen diese bei 70-130°C und für Polymethylmethacrylate bei 38-105°C. Der E-Modul nimmt dabei stark ab. Die Temperaturempfindlichkeit hängt vom Vernetzungsgrad ab. Für statische Beanspruchung wird ein Klebstoff mit hohem Vernetzungsgrad und hohem E-Modul empfohlen.

Die reine Klebstoffprobe mit freier Querkontraktion verhält sich weicher als der Klebstofffilm zwischen steifen Fügeteilen. Dann ist die Querkontraktion behindert und erreicht maximal das Maß der Fügeteile. Der E-Modul kann dadurch 30-50 % höher liegen. Die Fügeteileigenschaften beeinflussen demnach wesentlich das Verhalten der Klebschicht. Da die Behinderung der Querkontraktion mit zunehmender Klebschichtstärke abnimmt, liegt der E-Modul einer dicken Klebefuge unter dem einer dünnen. Der E-Modul einer Klebschicht (Index K) lässt sich aus den Eigenschaften der reinen Polymersubstanz (Index S) und denen der Fügeteile aus gleichem Werkstoff (Index F) nach [14] berechnen:

$$E_K = \frac{E_S - 4G_S}{\frac{E_S}{G_S} - 3 - \frac{2\nu_F}{E_F}(E_S - 2G_S)}, \quad (4.16)$$

wobei E-Modul und Schubmodul bei isotropen Werkstoffen durch die Querkontraktion über

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.17)$$

verbunden sind.

Die polymeren Klebstoffe reagieren zusätzlich sensitiv auf die angelegten Zugspannungen. In [14] wird ein Beispiel genannt, bei dem Klebstoffe unter Aufbringung von 20-30 MPa Zugspannung bis zu 50% ihres E-Moduls verlieren. Damit wird eine Klebschicht unter hoher Beanspruchung zunehmend verformungsfreudiger. Das ist zumindest für den Abbau von Spannungsspitzen an Überlappungsenden von Klebungen als Vorteil zu werten.

Insgesamt birgt das beschriebene Verhalten der Klebstoffe ausreichend Potential zur Fehleinschätzung und erschwert Berechnungen und Vorhersagen. Versuche an Originalgeometrien von Strukturklebungen bleiben damit auch in Zukunft unumgänglich.

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Material	$\rho$ kg/dm <sup>3</sup>	$\sigma_M$ MPa	$\varepsilon_M$ %	$E_t$ GPa	Norm	Quelle	Hinweis
DP490 3M		37,6	3,2	1,714	ISO 527	[18]	10 mm/min
UP-Harz	1,219	60	2,0	4,8 3,5-4,0		[69] [14]	
GF-UP			0,1-0,2	12-25		[14] [77]	⊥
GUP Matte	1,48 1,58 1,7	110 250 210	2,0 2,4 0,4	9,5 12,4 16	ISO527	[10] [69] [28] [77]	$\phi = 0,2$ $\psi = 0,5-0,55$ 
GFK Gewebe	1,88 1,76	340 320	3,4 3,7 1,0	27 20	ISO527	[69] [28] [77]	$\psi = 0,55-0,6$ 
GUP Roving	1,62 1,76	215 680		15,8 30		[10] [10]	$\phi = 0,3$ $\phi = 0,4$
GUP-Matte- Gewebe 50 %	1,62 1,7	185 300	3,5	12,9 17	ISO527	[10] [28]	$\psi = 0,3$ $\psi = 0,5-0,55$
Stahl 1.4301 X5CrNi18-10	7,85 7,9	520(220)* 638(326)*	45	190-210 215		[78] [79] [43]	allg. Stahl * $R_m(R_{p0,2})$ * $R_m(R_{p0,2})$ $\nu = 0,31$
Blech längs Blech quer Stahl rostfrei		520(210)* 720(250)*	45 45		[80] [80]	[81] [81]	* $R_m(R_{p0,2})$ * $R_m(R_{p0,2})$
Sikadur-31CF	1,90	18-24	0,4±0,1	5,0	EN 196 ISO 75 ISO 527	[7]	
Sikadur-30	1,65	33		12,8	ISO 527	[6]	
Sikadur-330	1,31	30 38,1±2,1 30	0,9 0,97±0,13 1,5	4,5 4,6±0,1 3,8*	ISO 527 ISO 527	[8] [72] [82]	Zug *Biegung
Sikadur-T14	1,4	3,2	400			[5]	

**Tabelle 4.6:** Literaturangaben zu Werkstoffkenngrößen

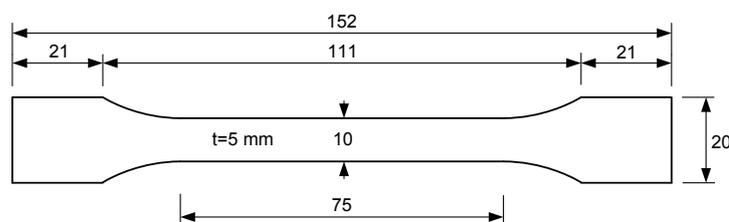
E-Modul, regressiv $\varepsilon = 0,05 - 0,25\%$ DIN EN ISO 527-2 [74]	1630	MPa
E-Modul, Sekante $\varepsilon = 0,25 - 1\%$ DIN EN ISO 527-2 [74]	1460	MPa
Bruchdehnung $\varepsilon_B$ DIN EN ISO 527-2 [74]	3,95	%
Querdehnzahl $\nu$ bei $\varepsilon = 0,5\%$ DIN EN ISO 527-2 [74]	0,43	[-]
Schubmodul G, Sekante, $\tan\gamma = 0,01 - 0,05$ DIN EN 14869-2 [83]	137	MPa
Gleitung $\tan\gamma_{Bruch}$ DIN EN 14869-2 [83]	0,81	[-]
Schubbruchspannung $\tau_B$ DIN EN 14869-2 [83]	24	MPa
Empfehlung $t_{kleb}$	0,05 - 0,15	mm

**Tabelle 4.7:** Herstellerangaben zu den mechanischen Kenngrößen des DP490 [84]

#### 4.4.2 Probengeometrie

Die Geometrie der Klebstoffschulterstäbe nach DIN EN ISO 527-2 [74] orientiert sich am Prüfkörper 1A [74]. Die Abweichungen von der Norm können Abb. 4.35 entnommen werden. Die Messlänge des Extensometers beträgt für alle Prüfungen  $L_0 = 50$  mm.

Die GFK-Streifenproben sind 25 mm breit und 2 mm hoch und entsprechen dem Typ 2 nach DIN EN ISO 527-4 [75]. Die Edelstahlblech-Streifenproben sind 25 mm breit und 1,5 mm hoch und entsprechen der Probenform Nr. 3 Tab. B.1 der DIN EN ISO 6892 [85].



**Abb. 4.35:** Geometrie der Klebstoffschulterstäbe

#### 4.4.3 Verwendete Werkstoffe und deren Probenbezeichnung

Die Proben sind über die folgenden Kurzbezeichnungen und einen nachgestellten Zähler gekennzeichnet:

- GFK.0** GFK-Streifenprobe (Kap. 4.3.2) in  $0^\circ$ -Richtung des Laminates (Abb. C.4)
- GFK.45** GFK-Streifenprobe (Kap. 4.3.2) in  $45^\circ$ -Richtung des Laminates ( Abb. C.2, C.4)
- MA** UHU plus multifest, 2K-MMA-Klebstoff, schnellhärtend [4] (Abb. C.3, C.9)
- DP490** 3M Scotch-Weld DP490, 2K-Epoxidharzklebstoff, zähelastisch, hochfest, [3] (Tab. 4.7, Abb. 4.36, 4.38)

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

- Anchorfix1** Sika Anchorfix 1, 2K-MMA-Klebstoff zur Ankermontage [76] (Abb. C.8)
- SI330** Sikadur-330, ungefüllter, thixotroper 2K-EP-Bauklebstoff [71] (Abb. 4.36, C.8)
- SI30** Sikadur-30, mineralisch gefüllter, sehr steifer, 2K-EP-Bauklebstoff [6] (Abb. C.7)
- SI31** Sikadur-31 CF Normal, mineralisch gefüllter, steifer, 2K-EP-Bauklebstoff [7] (Abb. C.6)
- UP** Laminierharz VIAPAL UP 242 BMT/57, UP-Härter CUROX M-300 (MEKP), ein mit Celluloseflocken und Glasfaserschnitzel angereichertes 2K-Standardlaminierharz auf Polyesterbasis (Abb. C.2, C.5)
- PUR** Sikabond-T14, 1K-Polyurethan-Bauklebstoff, feuchtigkeitshärtend, zähelastisch [5] (Abb. C.5, 4.37)
- 1.4301** 1.4301-Edelstahlblech-Streifenprobe, Kurzname X5CrNi18-10, mit hoher Bruchdehnung (Abb. C.1)

Die Klebstoffproben sind nach ihrer Aushärtung bei Raumtemperatur noch 7 h bei 60°C im Temperofen nachbehandelt worden. Auch die PUR-Proben sind mit ausreichendem zeitlichen Abstand dieser Behandlung unterzogen worden, um gleiche Voraussetzungen für alle zu vergleichenden Klebstoffe zu schaffen. Die DP490-Proben wurden nach Herstellerangaben unmittelbar nach Befüllen der Schulterstabformen für 2 h im Temperofen bei 65°C ausgehärtet.

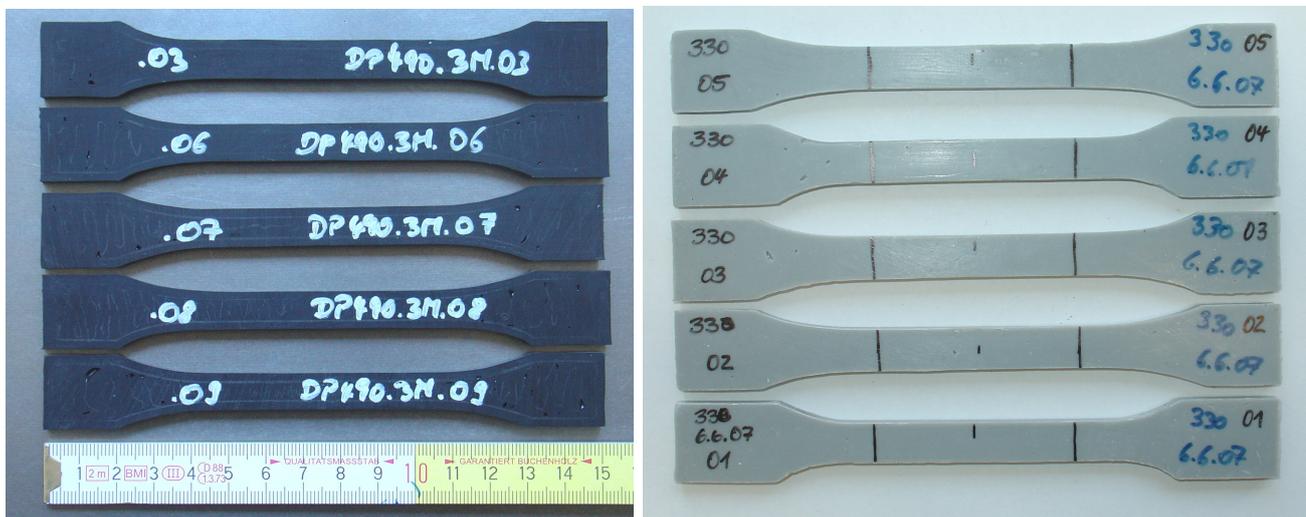
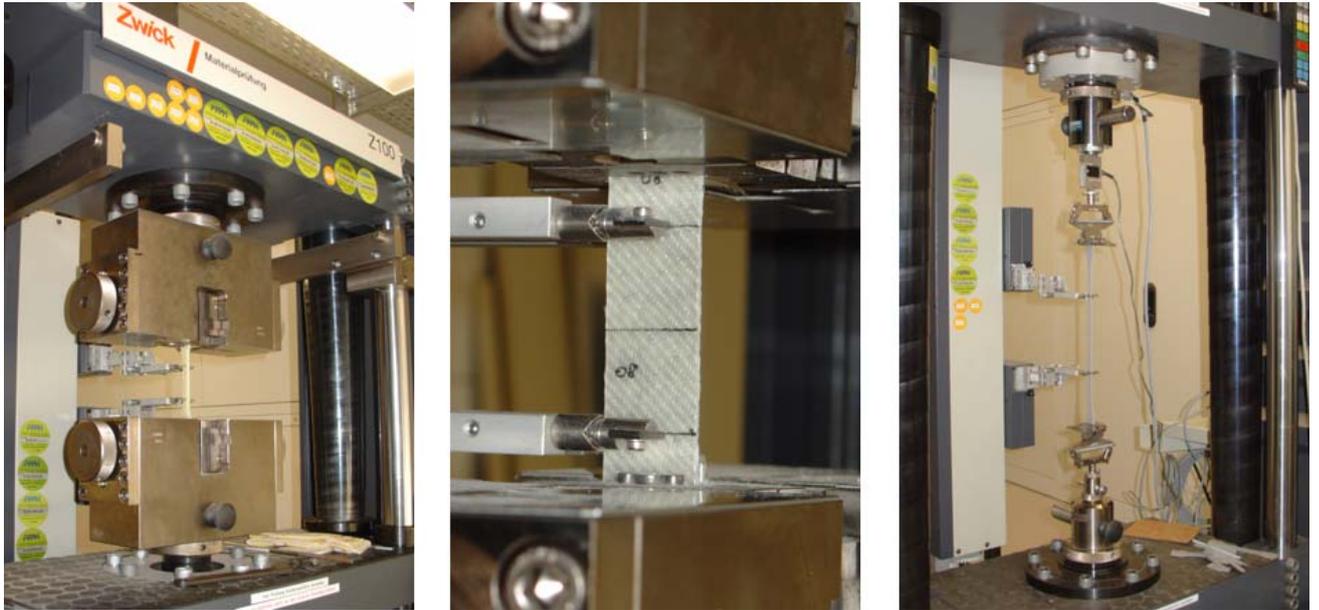


Abb. 4.36: DP490- und SI330-Substanzproben für Zugversuche

#### 4.4.4 Versuchsdurchführung

Die Zugversuche wurden an der MFPA Weimar durchgeführt. Die Prüfmaschine ist eine Zwick Z100 (Abb. 4.37). Die Dehnungen werden mit dem Multisens, einem Extensometer, gemessen. Die Versuchssteuerung erfolgt über die Dehngeschwindigkeit im Messbereich  $L_0 = 50$  mm.

#### 4.4 Zugversuche an Substanzproben



**Abb. 4.37:** Versuchsdurchführung an einer Z100 der MFFPA Weimar (MA, GFK.0 und PUR)



**Abb. 4.38:** Zugversuch 3M DP 490 mit 4%/min

Das Prüf- und Probenlagerklima entspricht mit 23°C und 50% r.L.F. dem Normklima. Die Werkstoffe werden jeweils mit konstanter Dehngeschwindigkeit bis zum Bruch gezogen.

Die Klebstoffe werden in drei Prüfgruppen geteilt. Die Prüfungsgeschwindigkeiten wurden so gewählt, dass eine Prüfung zwischen 60-120 s dauert. Der hochelastische Sikabond-T14

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

wird mit 200 mm/min (400 %/min) geprüft. Der zähelastische DP490 wird mit 2 mm/min (4 %/min) gezogen. Alle anderen Klebstoffe und die GFK-Proben werden durch die geringe erwartete Bruchdehnung mit 0,5 mm/min (1 %/min) untersucht. Die Stahlzugproben wurden mit einer Dehnrage von  $0,002 \text{ s}^{-1}$  bis zum Bruch gefahren.

Es werden fünf gültige Prüfungen durchgeführt, d.h. eine Probe darf nicht in der Einspannung oder 10 mm entfernt davon brechen und es darf kein offensichtlich vorzeitiges Versagen aufgrund eines Probenfehlers (z. B. Lufteinschluss bei Klebstoffen) auftreten. Für die Stahlzugversuche standen vier Probekörper zur Verfügung.

Da in den Zugscherversuchen mit Strukturklebstoffen überwiegend ein Versagen in der GFK-Oberfläche durch Abreißen der ersten oberflächennahen Harzschicht bzw. durch Delamination der ersten Faserlage auftrat, werden GFK-Proben zusätzlich senkrecht zu den Faserlagen in Haftzugversuchen an 50 mm-Rundproben auf interlaminare Zugfestigkeit untersucht. Für sämtliche Versuche wurden GFK-Proben der gleichen Grundgesamtheit verwendet. Als Haftzugklebstoff wird DP490 verwendet. Die Prüfkörper werden beidseitig zwischen Stahlstempeln geklebt und mit einer Prüfgeschwindigkeit der Traverse von 1,0 mm/min bis zum Bruch belastet (Abb. 4.45).

##### 4.4.5 Ergebnisse

Für die Kunststoffe erfolgt die Berechnung des E-Moduls aus den  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurven zwischen  $\varepsilon_1 = 0,0005$  (0,05 %) und  $\varepsilon_2 = 0,0025$  (0,25 %) über

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4.18)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.19)$$

Eine Ausnahme bildet der PUR-Klebstoff, der bei geringster Last schon sehr große Dehnungen aufweist. Der E-Modul wird an diesem Klebstoff im Dehnungsbereich 1-10 % bestimmt. Die Bruchdehnungen der Werkstoffe SI30, UP und Anchorfix1 sind so gering (Abb. 4.39, Tab. 4.8), dass bei den Auswertungen bei einzelnen Prüfkörpern auf ein auf 0,0016 (0,16 %) verringertes  $\varepsilon_2$  zurückgegriffen werden muss.

Für die Darstellung der Spannungen und Dehnungen als Quantile der Bruchwerte in Abb. 4.39 wird eine Auswertung mit dem geometrischen Mittelwert vorgenommen. Er liegt geringfügig unter dem arithmetischen Mittelwert. Die Merkmalskenngrößen  $x$  werden mit  $y = \lg x$  substituiert, sodass sich die Quantilwerte entsprechend (4.14) ergeben zu

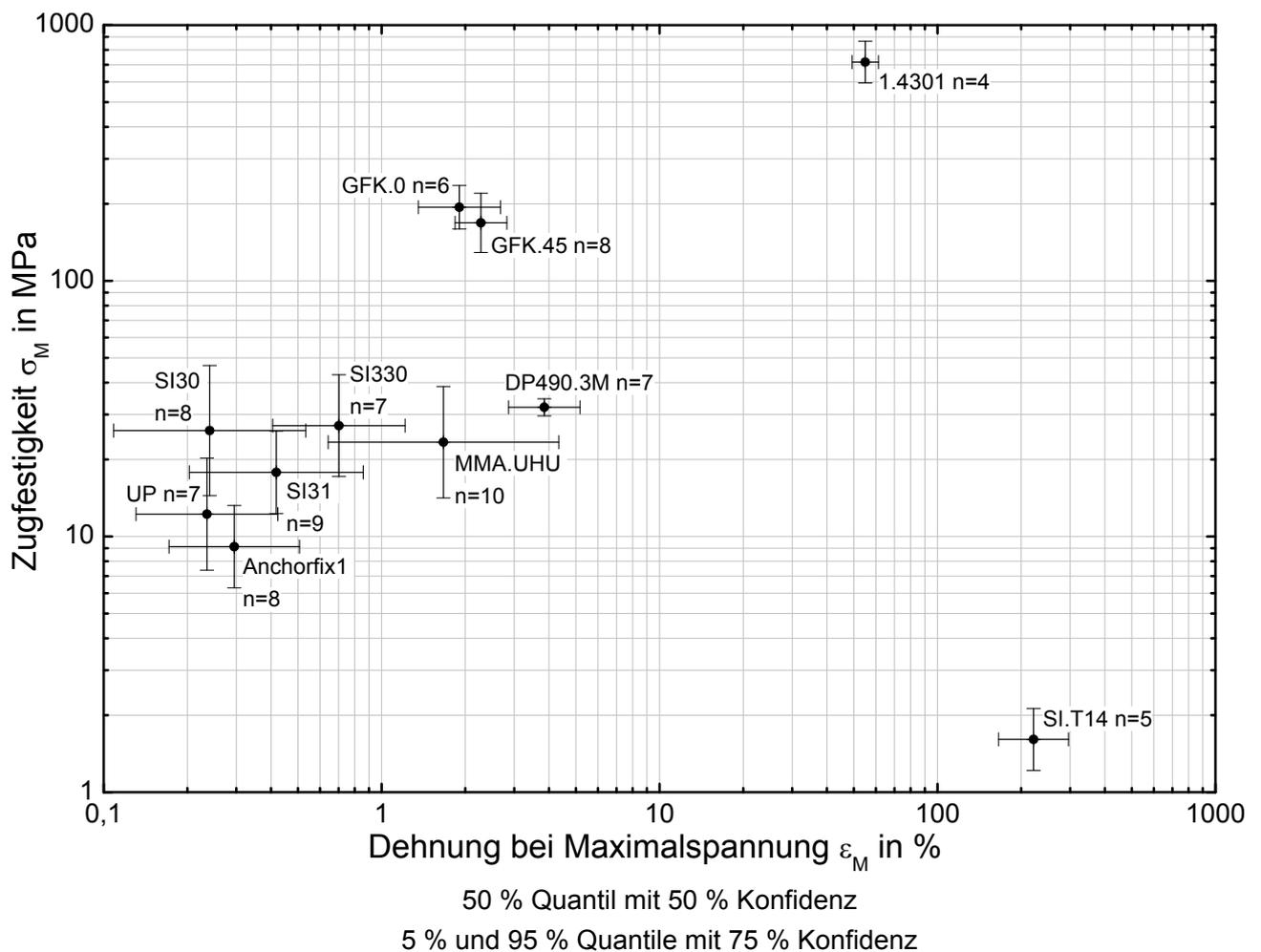
$$y_p = \bar{y} \pm k_s \cdot s_y \quad (4.20)$$

Für die Darstellung über eine logarithmische Achsenteilung werden die substituierten Werte wieder delogarithmiert.

$$x_{0,05} = 10^{(\bar{y} - k_s \cdot s_y)} = \frac{10^{\bar{y}}}{k_s \cdot s_y}$$

$$x_{0,95} = 10^{(\bar{y} + k_s \cdot s_y)} = 10^{\bar{y}} \cdot k_s \cdot s_y \quad (4.21)$$

Die skalierte Standardabweichung  $k_s \cdot s_y$  hat nun die Form eines Faktors der mit dem geometrischen Mittelwert  $10^{\bar{y}}$  die Quantilwerte ergibt. Der Vorteil dieser Auswertung gegenüber der Verwendung des arithmetischen Mittelwertes mit Addition bzw. Subtraktion von  $k_s \cdot s_x$  liegt im positiv reellen Wertebereich der Ergebnisse für jeden Quantilwert. Bei großen Streuungen der Merkmalskenngößen und einer hohen geforderten Konfidenz könnten sich sonst für rechnerisch kleine Quantilwerte negative Ergebnisgrößen ergeben.



**Abb. 4.39:** Spannungs- und Dehnungsbruchwerte der Zugversuche an Substanzproben mit Angabe der Mittel- und bemessungsrelevanten Quantilwerte

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Die Tabelle 4.8 fasst die Ergebnisse der Zugversuche zusammen und gibt für die Kenngrößen  $\sigma_M$ ,  $\varepsilon_M$  und  $E_t$  die Schätzwerte von Mittelwert und verzerrungsfreier Standardabweichung an (Kap. 4.1). Sehr anschaulich lassen sich die geprüften Werkstoffe im  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm (Abb. 4.39) gegeneinander vergleichen. Das Ziel einer Klebstoffauswahl für hochbelastete Kleinflächenklebungen sollte neben einer möglichst hohen Zugfestigkeit  $\sigma_M$  auch ein hohes Dehnvermögen sein, um die unvermeidlichen Dehnungsspitzen zu ertragen und größere Klebflächenbereiche zur Lastabtragung heranzuziehen. Diese Ansicht wird auch von HABENICHT [14] vertreten.

Die beiden Auswahlkriterien erfüllt der Klebstoff *3M Scotch-Weld DP490* in diesem Vergleich am besten. In Abb. 4.40 lässt sich das ausgeprägt nicht lineare  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Verhalten bei geringer Streuung nachvollziehen. Die mittlere Versuchskurve geht unverändert in die nichtlineare Materialbeschreibung der Berechnungen im Kap. 5.2 ein. Die bereits bekannten Materialkennwerte zum E-Modul und zur Bruchdehnung (Tab. 4.7) konnten mit den Versuchen bestätigt werden.

Der *Sikadur-330* erreicht im Mittel ebenfalls hohe Bruchfestigkeiten, streut in diesen Versuchen jedoch sehr stark. Er verhält sich gegenüber dem DP490 wesentlich steifer und weist etwa nur ein Viertel der Bruchdehnungen auf. In Abb. 4.41 lässt sich das klar lineare Verhalten bis zum Bruch belegen. Der Klebstoff SI330 geht in die Berechnungen im folgenden Kapitel mit linearem Ansatz ein. Im Vergleich mit anderen Quellen konnten die Kennwerte für den SI330 nicht bestätigt werden (vgl. Tab. 4.6 und 4.8).

Der *UHU plus multifest* liegt mit seinen Verformungseigenschaften zwischen SI330 und DP490. Das Verformungsverhalten ist nichtlinear, jedoch weniger ausgeprägt als beim DP490. Die Bruchfestigkeit liegt unter den beiden vergleichbaren Klebstoffen und streut zudem stark (Abb. 4.42). Das ausgeprägte Aushärtungsschrumpfen verbunden mit der kurzen Aushärtezeit stellt eine Herausforderung für die manuelle Schulterstabfertigung dar. Darin wird auch der Grund für die starke Streuung gesehen, die in den Zugscherversuchen (Kap. 4.3) nicht in dem Maß beobachtet werden konnte.

Mit geringster streuungsarmer Bruchfestigkeit und einer Dehnung von über 200% im Versagenszustand lässt sich der *Sikabond-T14* nicht mit den anderen Klebstoffen vergleichen (Abb. C.12). Er eignet sich für elastische Dickschichtverklebungen auf großen Flächen, bei denen die Klebefuge hohen Dehnungen unterworfen wird. Für den in dieser Arbeit vorgeschlagene Einsatzzweck kommt er nicht in Frage, weil die realisierbaren Verbindungskräfte zu niedrig bleiben.

Material	Proben- umfang	$\sigma_M \pm s$ MPa	$\varepsilon_M \pm s$ %	$E_t \pm s$ GPa
GFK.0	6	194,5 ± 16,5	1,92 ± 0,28	13,30 ± 1,84
GFK.45	8	169,6 ± 19,9	2,29 ± 0,21	10,89 ± 1,18
SI31	9	18,05 ± 3,13	0,44 ± 0,15	4,93 ± 0,33
SI30	8	26,77 ± 7,93	0,26 ± 0,11	11,15 ± 1,22
SI330	7	27,57 ± 5,54	0,72 ± 0,17	3,93 ± 0,24
MA	10	23,94 ± 5,52	1,81 ± 0,78	1,66 ± 0,17
DP490	7	32,03 ± 1,07	3,87 ± 0,47	1,62 ± 0,07
UP	7	12,47 ± 2,80	0,24 ± 0,07	5,18 ± 0,68
Anchorfix1	8	9,23 ± 1,50	0,30 ± 0,07	2,96 ± 0,16
PUR	5	1,62 ± 0,18	222,62 ± 26,17	0,002 ± 0,0003

**Tabelle 4.8:** Technische Werkstoffkenngrößen als arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen aus Zugversuchen an Substanzproben

Die Versuchsergebnisse der verbleibenden Klebstoffe *Sikadur-30*, *Sikadur-31 CF Normal*, *Sika Anchorfix 1* und das gefüllte *UP-Laminierharz* sind in den Abbildungen C.13 bis C.16 dokumentiert. Während die Herstellerangaben für den SI31 mit den Versuchen bestätigt werden können, müssen bei den anderen Klebstoffen Unterschiede zu den Literaturangaben festgestellt werden. Alle vier Klebstoffe zeigen ein sprödes Verhalten, streuen stark und erreichen geringe Bruchdehnungen von unter 0,5%. Die bemessungsrelevanten 5%-Quantile der Bruchspannungen liegen im Bereich von 6 - 11 MPa, wobei der Mittelwert für den SI30 nah am SI330 liegt (Abb. 4.39). Durch das geringe Arbeitsvermögen erscheinen diese Klebstoffe für die Verklebung von Lasteinleitungspunkten in GFK-Strukturen wenig geeignet.

Für die 1.4301-Blechzugproben mit den Abmessungen zwischen den Einspannstellen von 50 mm × 25 mm × 1,46 mm konnten die Ergebnisse in Tabelle 4.9 als Schätzwerte für die Mittelwerte und verzerrungsfreien Standardabweichungen für technische Spannungs- und Dehnungsgrößen ermittelt werden. Der Anfang der mittleren Zugversuchskurve der geprüften Serie ist in Abbildung 4.43 dargestellt und geht im Kapitel 5 mit nichtlinearem Materialverhalten umgerechnet in wahre Dehnungs- und Spannungsgrößen in die Modellierung ein. Das Bruchbild einer 1.4301-Probe ist in Abb. C.10 dokumentiert.

#### 4 Experimentelle Untersuchungen

Die Ergebnisse für die beiden Probenrichtungen des GFK in  $0^\circ$  und  $45^\circ$  unterscheiden sich nicht wesentlich. Die  $0^\circ$ -Richtung verhält sich durch die höhere Anzahl an Gewebelagen  $3 \times 300 \text{ g/m}^2 + 1 \times 165 \text{ g/m}^2$  gegenüber  $2 \times 300 \text{ g/m}^2$  in  $45^\circ$ -Richtung steifer, linearer und höher tragfähig (Abb. 4.44). Die Proben unter  $45^\circ$  zeigen bei etwa 140 MPa erste Faserbrüche und erlauben anschließende weitere Laststeigerungen (Abb. C.11). Das Versagen kündigt sich deutlich hörbar durch einzelne Faserbrüche an. Die Streubreite der Ergebnisse ist für beide Prüfrichtungen sehr ähnlich (Abb. 4.39). Für die Berechnungen im folgenden Kapitel wird unterstellt, dass die Wirkungsrichtung der Verbindungskraft mit der  $0^\circ$ -Richtung des Laminates zusammenfällt. Im idealisierten linearen Materialansatz für das GFK kommen demnach die Kennwerte der  $0^\circ$ -Richtung zur Anwendung. Ein Vergleich zu den Literaturwerten (Tab. 4.6) offenbart z.T. erhebliche Abweichungen. Besonders die ermittelten Bruchspannungen erreichen die Literaturwerte nicht. Die Einflussfaktoren auf die Laminatfestigkeit sind offensichtlich vielfältig. Möglicherweise beziehen sich die Angaben zu Gewebelaminaten auf reine  $0/90^\circ$ -Laminat- und nicht annähernd isotrop gestaltete Laminat-aufbauten wie im Fall des untersuchten Materials. Es ist daraus der Schluss zu ziehen, dass für die sichere Ermittlung der Kenngrößen eines selbst gestalteten Faserlaminates Versuche an eigenen Proben unumgänglich bleiben.

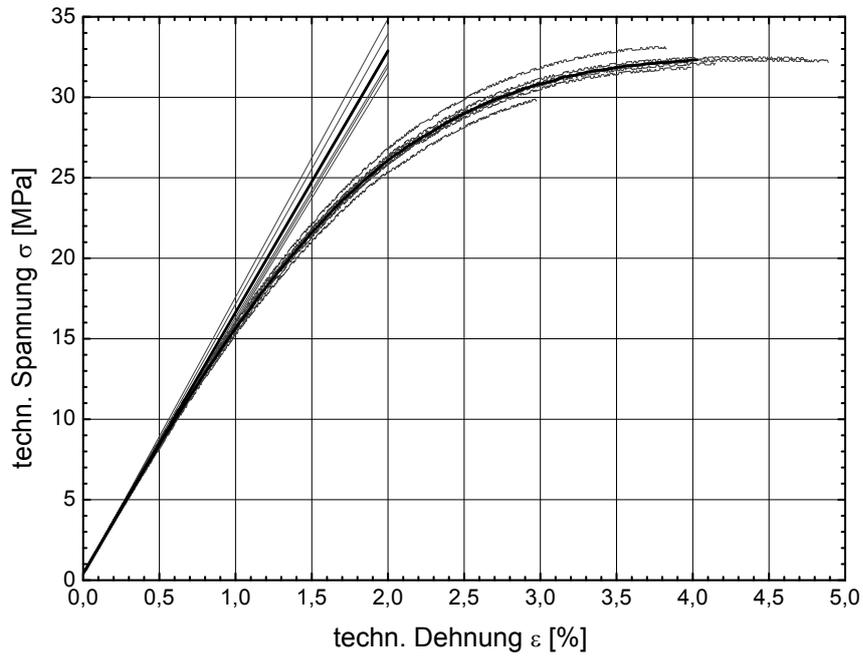
Die Bruchbilder aller geprüfter Zugproben sind im Anhang C zu finden. Insgesamt wurden 81 gültige Zugversuche an allen Werkstoffen durchgeführt.

In den interlaminaren Zugversuchen am GFK mit DP490 als Haftzugklebstoff konnte eine mittlere interlaminare Zugfestigkeit von 14,7 MPa nachgewiesen werden (Abb. C.17). Der Bruch trat, wie in den Zugscherversuchen, zwischen der ersten und zweiten Gewebelage auf. Die Laminierreihenfolge des Laminates war dabei ohne Einfluss, da Brüche auf beiden Seiten der Proben auftraten (Abb. 4.45). Als Einordnung des Ergebnisses sei darauf verwiesen, dass in DIN 18820-2 [86] für die interlaminare Zugfestigkeit für alle Laminat- der Wert 4 MPa als 5%-Quantil empfohlen wird.

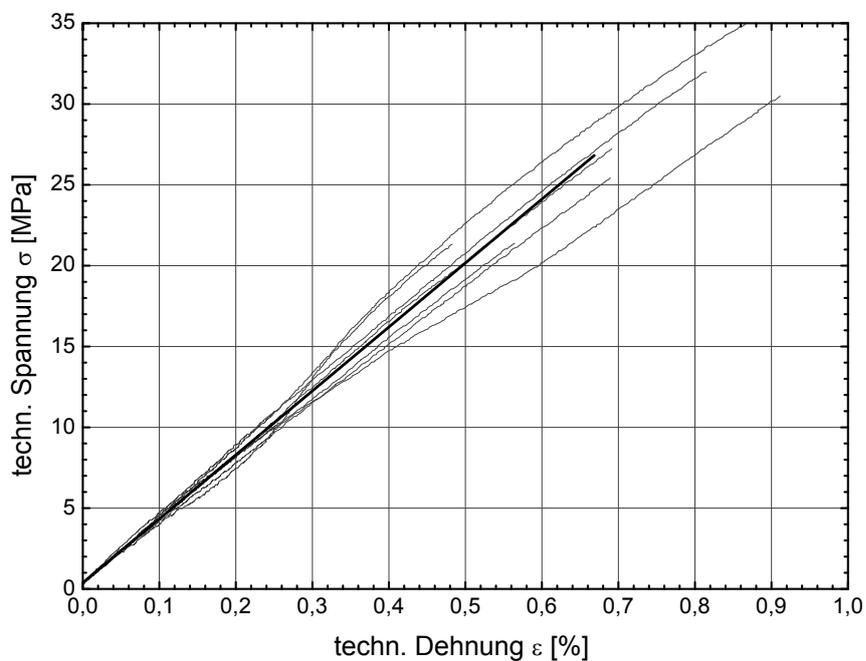
$A_0$ mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2} \pm s$ MPa	$R_{p1} \pm s$ MPa	$R_m \pm s$ MPa	$\varepsilon_M \pm s$ %
36,5	$315 \pm 8,7$	$349 \pm 7,0$	$737 \pm 51,8$	$55 \pm 2,2$

**Tabelle 4.9:** Technische Werkstoffkenngrößen aus Zugversuchen für Stahl 1.4301

#### 4.4 Zugversuche an Substanzproben

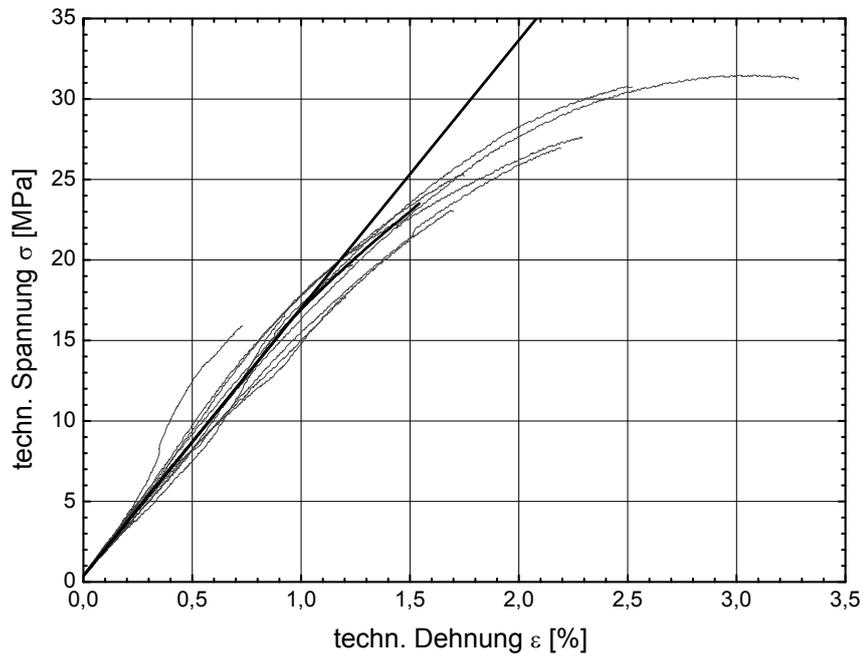


**Abb. 4.40:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen der DP490-Schulterstäbe mit  $v = 2,0$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und  $0,25$  %, ( $n = 7$ )

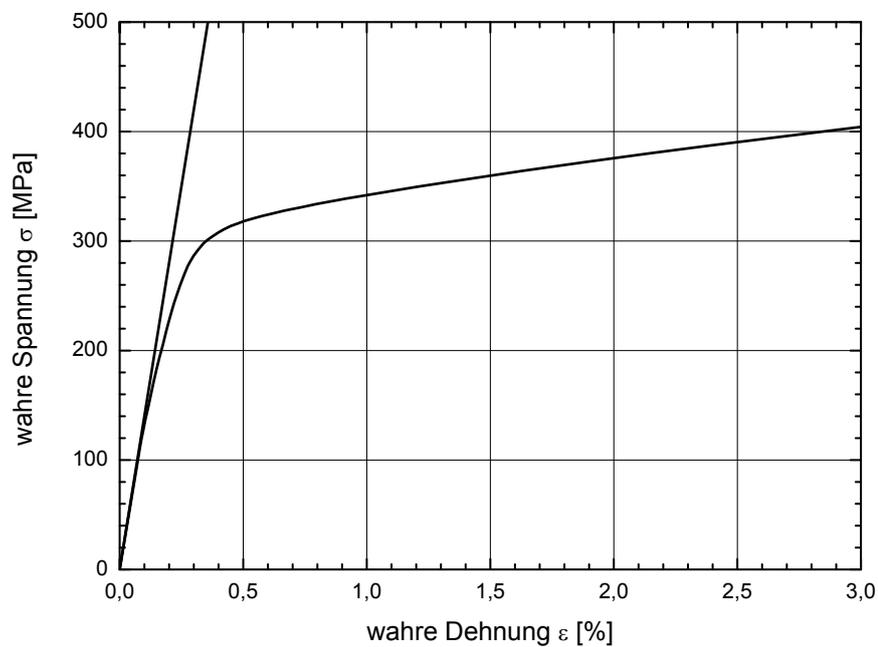


**Abb. 4.41:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen mit linearer Ausgleichsgerade der SI330-Schulterstäbe mit  $v = 0,5$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, ( $n = 7$ )

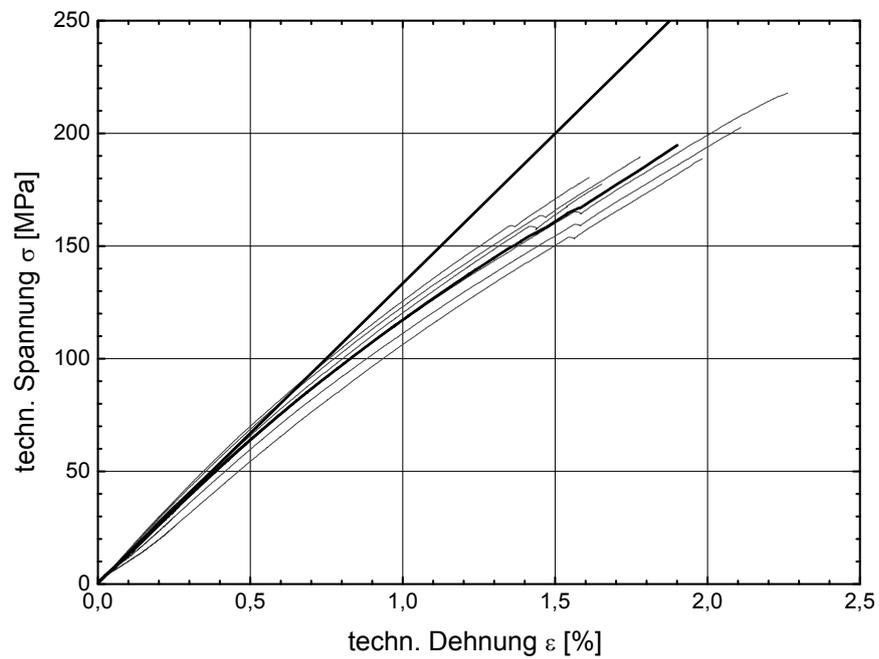
#### 4 Experimentelle Untersuchungen



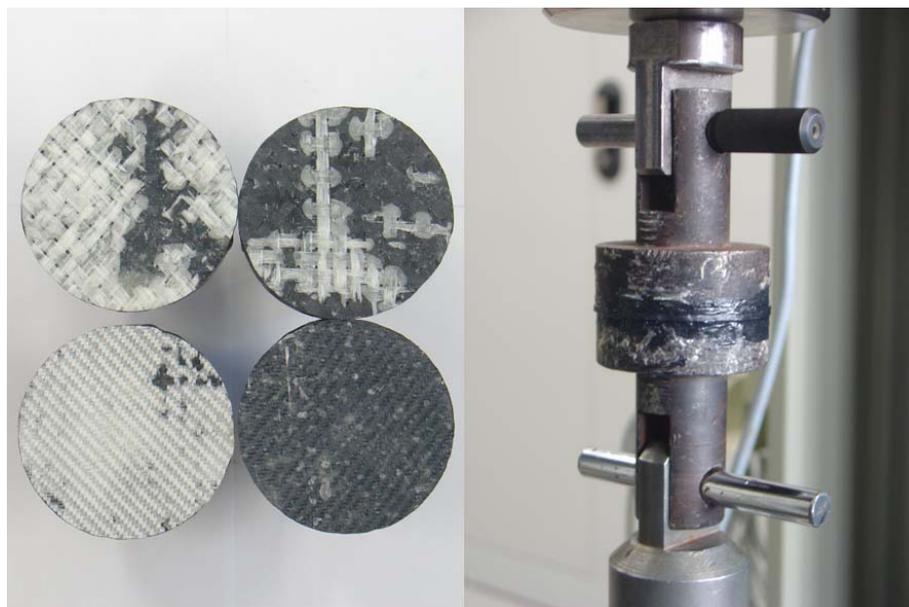
**Abb. 4.42:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen der MA-Schulterstäbe mit  $v = 0,5$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und  $0,25\%$ , ( $n = 10$ )



**Abb. 4.43:** Anfang der mittleren  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Kurve aus Zugversuchen der 1.4301-Flachproben, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und  $0,25\%$ , ( $n = 4$ ),  $R_m = 737$  MPa,  $\varepsilon_M = 55\%$



**Abb. 4.44:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen der GFK.0-Streifenproben mit  $v = 0,5$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und  $0,25$  %, ( $n = 6$ )



**Abb. 4.45:** Bruchbilder und Versuchsanordnung der interlaminaren Zugversuche an GFK-Rundproben  $d = 50$  mm

## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.4.6 Zusammenfassung zu den experimentellen Untersuchungen

Aus den verschiedenen Versuchen an bauteilähnlichen Proben, Stahl-GFK-Zugscherversuchen und Zugversuchen an Substanzproben können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die untersuchten bauteilähnlichen Verbindungen versagen duktil (Serie B-F). Durch einen Quereinbau des Bleches (Serie C) konnte eine Leistungssteigerung des Bruchkraftmittelwertes um +10,1% erreicht werden. Die Anschlussvarianten mit aufgesetzter Lastöse versagen durch Abschälen des Bleches vom GFK beginnend am Übergang vom steifen Ende der Öse zum Blech (Abb. A.6). Ein dickeres Blech würde bei dieser von Schälspannungen dominierten Lastübertragung eine Bruchkraftsteigerung erwarten lassen.
- Der Blechtyp II ist nicht nur durch die größere Klebefläche sondern vor allem durch die geringere Lastexzentrizität zur Klebefuge als leistungsfähigere Lasteinleitung zu bewerten.
- Der Unterschied der mittleren Bruchkraft zwischen den ungestützten und seitlich geführten bauteilähnlichen Versuchsproben liegt bei den Blechen Typ I bei +18,2% (Serie B zu D) und bei +7,2% für die Bleche Typ II (Serie F zu E). Die Laststeigerung ist vorhanden aber nicht signifikant, wenn man die Einflüsse anderer Geometrieparameter einer Verklebung betrachtet (Kap. 5.3.3). Die Versuchsbruchkräfte reagieren demnach wenig sensitiv auf die Biegesteifigkeit der umgebenden Sandwichstruktur.
- Die in den bauteilähnlichen Versuchen geprüften Verbindungsvarianten (Kap. 4.2) werden nicht weiter verfolgt, da auch ohne Auflaminat mit anderen Klebstoffen sehr leistungsfähige Lasteinleitungen mit kohäsiven Versagen innerhalb der Laminatschichten erreicht werden können. Technologisch vorteilhaft kann dadurch das Verkleben von Lastblechen getrennt vom Laminierprozess der Faserverbundstrukturen erfolgen, wenn Bauteilkanten besäumt sind und das Aushärtungsschwinden der FVK-Teile abgeklungen ist.
- Eine Übersicht zu den erreichten Bruchkräften, rechnerischen Klebscherfestigkeiten und Versagensformen der durchgeführten Zugscherversuche für die verschiedenen Kombinationen aus Klebstoff, Überlappungslänge und Oberflächenvorbereitung gibt Tab. 4.5.
- In den Zugscherversuchsreihen ergeben die Klebstoffe DP490, SI330 und MA mit technologisch einfachen Oberflächenvorbereitungen hohe Klebfestigkeiten in verwertbaren Streubreichen.

- Die besonders steifen Klebstoffe SI31 und UP mit geringer Bruchdehnung von unter 0,5% führen in den Zugscherversuchen zu geringen Klebfestigkeiten mit adhäsivem Versagen am Stahlfügeteil. Verbunden mit dieser Versagensform sind große Ergebnisstreuungen. Besonders deutlich wird das bei den zweischnittigen Versuchsproben (Abb. 4.26).
- Die individuell hergestellte UP-Klebstoffmasse aus gefülltem Laminierharz fällt in ihren mechanischen Eigenschaften und dem Verbundverhalten zum Stahl gegenüber SI330, MA und DP490 zurück und ist für die vorgeschlagene Verbindungslösung nur bedingt geeignet.
- Die mechanischen Kennwerte für die Klebstoffsubstanzen und Werkstoffe aus den Zugversuchen an Couponproben können der Tab. 4.8 entnommen werden. Der Klebstoff DP490 erreicht in dem Vergleich nicht nur die höchsten Zugscherfestigkeiten, sondern auch die größte Zugfestigkeit bei geringer Streuung (Abb. 4.39). Der Wert des E-Moduls des DP490 ist im Vergleich der Strukturklebstoffe der geringste. Dazu passend ist die Bruchdehnung des DP490 die größte in diesem Vergleich. Der sehr weiche und höchstdehnfähige 1K-PUR-Klebstoff wird wegen seiner geringen Eigenfestigkeit aus diesem Vergleich ausgeklammert.

## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen

Aus der Verbindungskombination Verklebung und nachträgliche mechanische Fügung (Kap.3) konzentrieren sich die Berechnungen auf den Teil der Klebeverbindung. Die Auslegung der über das direkt verklebte Anschlussblech hinausgehenden Stahlteile erfolgt mit Nachweisen des Stahlbaues unter Zuhilfenahme von standardisierten Verbindungsmitteln oder Bemessungsangaben aus bauaufsichtlichen Zulassungen.

Die Klebeverbindungen werden mit der Methode der finiten Elemente unter Einsatz elastoplastischen Materialverhaltens [87] ausgelegt. Die Einschränkungen von analytischen Ansätzen entfallen und der inhomogene mehrachsige Spannungszustand wird erfasst.

Die Herausforderung besteht in der Identifikation und Abbildung der Versagensmechanismen sowie der messtechnisch korrekten Ermittlung der Klebstoffkenngößen, die die mechanischen Eigenschaften beschreiben und das Versagen kennzeichnen.

### 5.1 Aktueller Forschungsstand und Bezug auf durchgeführte Analysen

Für analytische Betrachtungen werden mechanische Kenngrößen benötigt, die aus nachstehenden Versuchen gewonnen werden können:

- Zugscherversuche an einschnittig überlappten steifen Fügeteilen (Schubmodul, Schubfestigkeit, Gleitung bei maximaler Schubspannung) oder
- Zugtorsionsversuche an stumpf geklebten Rohrproben (Schubmodul, Schubfestigkeit, Versagenspunkte unter kombinierten  $\sigma$ - $\tau$ -Beanspruchungen, Gleitung bei maximaler Schubspannung) und
- Zugversuche an Substanzproben (Zug-E-Modul, Zugfestigkeit, Dehnung bei Zugfestigkeit, Querdehnzahl)

SCHLIMMER [87] modifiziert die Schubversuche mit einer Gleitungsregelung unter Elimination der Fügeteilverformung. Für die stumpf geklebte Rohrprobe wurde eine kombinierte Messtechnik entwickelt, die die Erfassung einachsiger und kombinierter  $\sigma_x$ - $\tau$ -Beanspruchungen ermöglicht. Dadurch kann die Klebstoffcharakterisierung an nur einer Probe erfolgen.

## 5.1 Aktueller Forschungsstand und Bezug auf durchgeführte Analysen

Die besten und reproduzierbarsten mechanischen Kennwerte werden von den Zugtorsionsversuchen erwartet.

Unter Kombinationsbeanspruchung werden unterschiedliche Fließpunkte und Spannungsmaxima ermittelt, die in ein modifiziertes DRUCKER-PRAGER-Modell eingehen. Die daraus abgeleitete Vergleichsspannung entspricht einer fiktiven einachsigen Spannung, auf die der mehrachsige Beanspruchungszustand reduziert wird.

Die Plastizitätsbedingung nach VON MIESES mit einem unendlich langen Fließzylinder in Richtung der hydrostatischen Achse ist für Kunststoffe weniger geeignet als das modifizierte DRUCKER-PRAGER-Modell, bei dem die hydrostatische Achse zweimal mit Fließflächen geschnitten wird. Das Fließen kann somit bei einem hydrostatischen Spannungszustand erreicht werden.

Die schubbasierte Vergleichsspannung nach dem modifizierten DRUCKER-PRAGER-Modell [87] lautet

$$\tau_v^2 = J_2' + \frac{1}{3} \cdot b \cdot \tau_v \cdot J_1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu} \cdot J_1^2, \quad (5.1)$$

mit der ersten Invariante des Spannungstensors  $J_1$  und der zweiten Invariante des Spannungsdeviators  $J_2'$

$$J_1 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_x \quad J_2' = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right)^2 \cdot \sigma_x^2 + \tau_{xy}^2. \quad (5.2)$$

Nach der VON MIESES-Theorie ergibt sich die Vergleichsspannung in Invariantenschreibweise zu

$$\sigma_v = \sqrt{3 \cdot J_2'}. \quad (5.3)$$

Dazu lässt sich die Invariante  $J_2'$  des Spannungsdeviators  $s_{ij}$  angeben mit

$$J_2' = \frac{1}{2} \cdot s_{ij} \cdot s_{ij}. \quad (5.4)$$

Im ebenen Verzerrungszustand lässt sich  $\sigma_v$  nach VON MIESES aus den richtungsabhängigen Spannungskomponenten berechnen mit

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \cdot (\nu^2 - \nu + 1) + \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot (2 \cdot \nu^2 - 2 \cdot \nu - 1) + 3 \cdot \tau_{xy}^2}. \quad (5.5)$$

Für Kunststoffe wird von BARDENHEIER in [88] empfohlen, eine Vergleichsspannung nach einem Kegelpotential zu berechnen, da durch die Kompressibilität des Werkstoffes unterschiedliches Druck- und Zugverhalten vorliegt. Die Vergleichsspannung

(5.6) wird über das Verhältnis der Schubbruchspannung zur Zugbruchspannung (5.7) an das reale Werkstoffverhalten angepasst.

$$\sigma_{v_{III}} = \frac{\sqrt{3} \cdot t - 1}{\sqrt{3} \cdot t} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \frac{1}{\sqrt{6} \cdot t} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (5.6)$$

$$t = \frac{\tau_B}{\sigma_{zB}} \quad \text{mit Begrenzung auf} \quad \frac{\sqrt{3}}{3} \leq t \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (5.7)$$

Die Querdehnzahl  $\nu$  verringert sich mit zunehmender Beanspruchung. Für einen zähelastifizierten Epoxidharzklebstoff (1K-EP Schmelzklebstoff) mit über 10 % Bruchdehnung, wie er im Automobilbau eingesetzt wird, zeigt SCHLIMMER, dass der Wert von 0,43 zu Versuchsbeginn auf ca. 0,40 bei Fließbeginn und dann bis zum Versagenspunkt asymptotisch auf 0,30 abfällt.

Im Vergleich zwischen Bruchversuch und einem FE-Modell einer gekerbten Zugscherprobe wurde festgestellt, dass unter gleichen Lasten im Modell geringere Verformungen ermittelt werden [87]. Das Modell verhält sich steifer als die Versuchsprobe. Für hohe Lasten ist diese Abweichung größer als für geringe Lasten, bei denen weniger Elemente die Fließgrenze erreichen. Unter Maximallast und linearem Materialverhalten für Klebstoff und Füge teil betragen die Abweichungen der globalen Gesamtverformung 50 %. Wird für die Analysen elastoplastisches Materialverhalten unterstellt, reduzieren sich die Abweichungen. Für eine Auswertung nach der VON MIESES-Fließbedingung beträgt die Abweichung 28 %. Bei einer kombinierten Auswertung, Klebstoff nach modifizierter DRUCKER-PRAGER-Fließbedingung und metallische Füge teile nach VON MIESES-Fließbedingung, beträgt die Abweichung 19 %. Wird bereits für 95 % der Bruchlast ausgewertet, werden deutlich geringere Abweichungen zwischen analytischer Lösung und experimentellem Befund festgestellt.

Die für die vorliegende Arbeit zur Verfügung stehende Messtechnik konnte die Querdehnzahl in Zugversuchen nicht bestimmen und auch keine gleitungsgeregelten Zugscherversuche unter Echtzeitelimination der Füge teilverformung realisieren. Die Kennwertermittlung kann demnach nicht vollständig durchgeführt werden und wird mit Literaturangaben zu den fehlenden Kenngrößen ergänzt.

Im Unterschied zu den genannten Arbeiten, bei denen ausschließlich metallische Füge teile verklebt wurden, wird in der vorliegenden Arbeit ein GFK-Füge teil verwendet. Wie die Versuche (Kap. 4.3.8) zeigen, liegt unter Verwendung leistungsfähiger Strukturklebstoffe der Schwachpunkt nicht mehr in der Klebschicht oder in den Grenzflächen zwischen den Materialsichten, sondern im GFK, dass durch sein geringeres Dehnvermögen senkrecht zu den Faserlagen durch interlaminaren Matrixbruch versagt.

Das Materialverhalten des GFK kann bis zur Grenzdehnung als annähernd linear angesehen werden (Kap.4.4.1). Die Grenzdehnung ist die Dehnung, bei der die lokale Schädigung in der Verbundstruktur durch überproportionale Zunahme von Mikrorissen einen versagenskritischen Zustand erreicht. Die GFK-Grenzdehnung reagiert nicht sensitiv auf den Glasvolumenanteil, die Verformungsgeschwindigkeit und -dauer sowie zyklische Be- und Entlastung. Selbst die Bruchdehnung der Matrix (übliche UP-Harze) hat einen geringen Einfluss auf die Bruchdehnung des GFK, da die Längssteifigkeit und die Querdehnungsbehinderung des Harzes vom Fasergehalt in Längs- und Querrichtung abhängt. Einflüsse werden nur aus der Faserausrüstung, der Benetzbarkeit der Fasern und dem Aushärteverfahren (Tempern) erwartet [77]. Das von SCHLIMMER vorgestellte Berechnungsmodell für Klebverbindungen wurde zwar als USERMAT-Routine für ANSYS® formuliert, steht aber aus Gründen des Urheberrechtes den Nutzern von ANSYS® nicht frei zur Verfügung und kann auch nicht über Distributoren von ANSYS® bezogen werden.

In der Bauingenieurpraxis werden die Kapazitäten für eine vollständige Charakterisierung der Klebstoffe nur in den seltensten Fällen vorhanden sein. Bei der großen Anzahl unterschiedlicher Laminatvarianten und vor allem Klebstoffe ist es zudem nicht verwunderlich, dass für die verwendeten kommerziellen Klebstoffprodukte nur wenige Kennwerte überhaupt von Herstellern bereitgestellt werden können. Manchmal fehlen mechanische Kennwerte ganz.

Mit den genannten Randbedingungen wird versucht, eine Berechnung mit den bereits implementierten Materialgesetzen, gestützt auf Kennwerte aus einfach ausführbaren Zugversuchen, durchzuführen. Im Anschluss an die Berechnungen werden Überlegungen für eine Bemessung unter Abschätzung aller die Tragfähigkeit vermindernenden Einflüsse dargelegt.

### 5.2 FE-Modellierung der Zugscherversuche

Ausgewählte Zugscherversuche aus Kapitel 4.3 werden mit einem fein diskretisierten FE-Modell in ANSYS® nachgerechnet. Für die bekannten mittleren Versuchsbruchlasten, passend zu den jeweiligen Klebstoffen, werden die maximalen Spannungen bzw. Dehnungen im Modell bestimmt. Die Berechnung erfolgt implizit mit ANSYS® 11. Die Zugscherprobe ist im Verhältnis zur Klebsichtdicke sehr breit. Voruntersuchungen [89, 44] zeigen, dass eine 2D-Modellierung als ebener Verzerrungszustand eine hinreichend genaue Abbildung der Aufgabe ermöglicht. Die verwendeten nichtlinearen Materialparameter werden aus den Zugversuchen (Kap. 4.4) abgeleitet und sind im Anhang D dokumentiert. Eine einschnittig überlappte Klebeverbindung erzeugt Verdrehungen und Verschiebungen, die die Beanspruchungen in der Verbindung beeinflussen. Die Berechnungen erfolgen deshalb

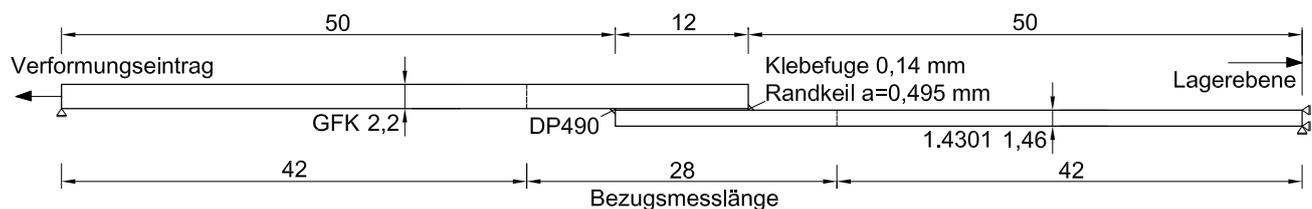
## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen

geometrisch nichtlinear. Diese Festlegungen wirken sich wesentlich auf die Modellgröße und den Berechnungsaufwand aus, da z.B. adaptive Vernetzungen oder Submodelltechniken nicht angewendet werden können.

### 5.2.1 Geometrie

Die Modellgeometrie wird möglichst genau der Probekörpergeometrie nachempfunden (Abb. 4.17). Die Klebefuge ist 12,0 mm lang, 0,14 mm dick und schließt beidseitig mit einem linearen Klebstoffkeil ab, dessen Schenkellänge 0,49 mm beträgt und somit eine Fläche einschließt, die einem Ausrundungsradius von  $r = 0,75$  mm entspricht (Kap. 4.3.3).

Der GFK-Streifen geht mit einer Dicke von 2,2 mm in das Modell ein und ist 62,0 mm lang. Davon sind 50 mm freie Länge zwischen Einspannung und Klebefuge. Für das Stahlblech gilt die gemessene Dicke von 1,46 mm bei gleicher Länge. Für die überlappte Zugschergeometrie mit der doppelten Klebschichtlänge von 24,0 mm wächst die gesamte Prüfkörperlänge mit der Überlappungslänge um 12 mm auf 124 mm.



**Abb. 5.1:** Modellgeometrie der Zugscherversuche mit 12 mm Überlappung

### 5.2.2 Material

Aus der Probenvielzahl der Klebstoffzugversuche wurden zwei Klebstoffe gewählt, die sich unterschiedlich verhalten, aber vergleichbar hohe Bruchkräfte in den Zugscherversuchen hervorbrachten. Abb. 4.41 zeigt für den SIKADUR 330 ein nahezu lineares Verhalten bis zum Bruch. Der DP490 von 3M verhält sich im Zugversuch (Abb. 4.40) ausgeprägt nicht-linear. Die Elastizitätsmoduli aus den Versuchskurven unterscheiden sich um den Faktor  $E_{SI330} / E_{DP490} = 3927 / 1624 = 2,42$ .

Die technischen Spannungs- und Dehnungswerte aus den Zugversuchen werden für einen nichtlinearen Materialansatz in wahre Spannungen umgerechnet:

$$\sigma_{wahr} = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (5.8)$$

$$\varepsilon_{wahr} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5.9)$$

Die Daten der mittleren Versuchskurven für die einzelnen Werkstoffe (Klebstoff DP490 und Stahl 1.4301) werden direkt als wahre Spannungs-Dehnungs-Kurven jeweils mit einem multilinear isotropen Ansatz (MISO) berücksichtigt. Die wahren Spannungs-Dehnungs-Wertepaare sind tabellarisch (Anhang D) für die Berechnungen aufbereitet.

Das GFK wird als Kontinuum elastisch und entsprechend seiner Gewebeausrichtung mit unterschiedlichen Kenngrößen für die einzelnen Raumrichtungen mit  $E_x = E_z = 11920 \text{ N/mm}^2$ ;  $E_y = 4000 \text{ N/mm}^2$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $G_{xy} = G_{yz} = 2500 \text{ N/mm}^2$ ,  $G_{xz} = 9300 \text{ N/mm}^2$  modelliert. Die E-Modulwerte in den Hauptrichtungen des gesamten Laminataufbaues stammen aus den Zugversuchen in  $0^\circ$ -Richtung. Der Schubmodul in Laminatenebene entspricht dem unter  $45^\circ$ -Richtung des Gesamtlaminates ermittelten Modul. Beide Werte sind Mittelwerte der Versuchsreihen und werden für den linearen Materialansatz in Anlehnung an [90] und [91] als Sekantenmodule zwischen 10 % und 50 % der Bruchfestigkeit bestimmt. Der E-Modul in Laminatdickenrichtung wird für ein querdehnungsbehindertes Harz mit  $4000 \text{ N/mm}^2$  abgeschätzt. Die vom Harztragverhalten dominierten Schubmodule außerhalb der Laminatenebene wurden mit  $2500 \text{ N/mm}^2$  abgeschätzt. Die Querdehnzahl von 0,3 ist eine Annahme, wie sie von verschiedenen Autoren für GFK verwendet wird.

In den FE-Modellen liegt das GFK-Fügeteil oben und endet auf der rechten Seite der Klebung, während das Stahlblech unten liegt und linksseitig mit dem Klebbereich abschließt.

Das Ver- und Entfestigungsverhalten des Materials wird in den nachstehenden Ausführungen nicht berücksichtigt, da die Berechnungen für die Erstbelastung analog zu den Versuchen erfolgen. Ebenso werden das Kriech- und Relaxationsverhalten, die Temperaturabhängigkeit und das Alterungsverhalten aus Medieneinflüssen im Berechnungsmodell nicht abgebildet. Eine Abschätzung zu den Degradationen aus ausgewählten Einflüssen erfolgt bei den Betrachtungen zur Bemessung im Kapitel 6.1.

### 5.2.3 Element- und Netzauswahl

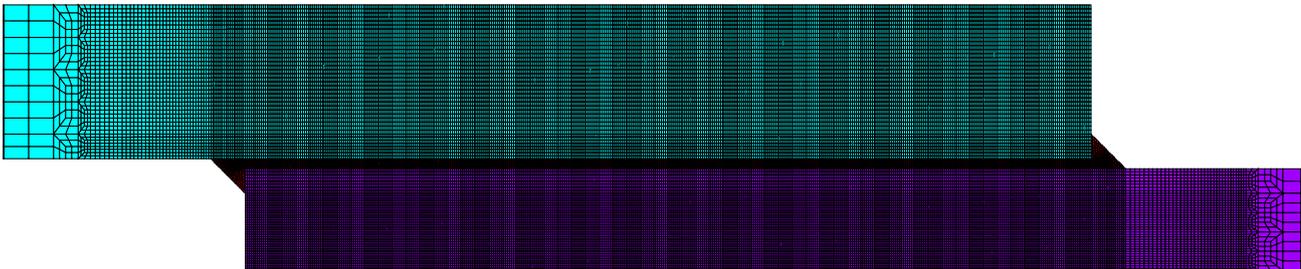
Die ebene Modellierung erfolgt mit 8-knotigen PLANE183-Elementen mit quadratischem Ansatz mit einem regelmäßigen Rechtecknetz (mapped meshing). Für eine Aussage zu den

## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen

Spannungs- und Dehnungsverteilungen über die Dicke der Klebschicht wurde für die Modelle der Zugscherproben eine Elementanzahl von  $n=10$  über die Klebschichtdicke gewählt. Die Mindestelementanzahl liegt für einen quadratischen Ansatz bei  $n=5$ . Das Netz wird vom Klebbereich her nach außen gröber. Das maximale Seitenkantenverhältnis aller Elemente beträgt 2 : 1 (Abb. 5.2 u. 5.3).

Am Auslauf der Klebefuge ist jeweils eine Ausrundung an den Versuchsproben vorhanden. Die exakte Nachbildung der Rundung führt zu kritischen Elementformen, sodass eine Idealisierung zu einem linearen Klebstoffkeil gleicher Fläche vorgenommen wird. Nach VALLÉE [44] ist die Form der Kerbe für die vorgesehenen Betrachtungen nicht entscheidend. Wichtig ist nur, dass die Klebschicht nicht abrupt endet.

Die Vorgabe von  $t_{kleb}/10$  für die kürzeste Elementkante und das gewählte maximale Elementkantenverhältnis von 2:1 führte zu einer Gesamtknotenanzahl von 143.000 für die 12 mm überlappte Zugscherverbindung. Die Rechenzeit hängt wesentlich vom nicht linearen Verhalten des Klebstoffes ab. Für den DP490 ergeben sich durch die Vielzahl an Iterationsschritten Rechenzeiten von etwa 1,5 Stunden (64-bit Workstation,  $4 \times 2,83$  Ghz Xeon 5440 Prozessoren, 16 GB RAM).



**Abb. 5.2:** Modellausschnitt der FE-Vernetzung der Zugscherprobe mit  $l_{\ddot{u}}=12$  mm

### 5.2.4 Randbedingungen und Lasten

Die Verschiebungsrestriktion  $u_x = 0$  für alle Knoten, 50 mm rechts der Klebefuge, bildet die Einspannung durch die Klemmbacken der Prüfmaschine ab. Senkrecht dazu wird ein Knoten in der Mitte der Lagerkante mit  $u_y = 0$  fixiert. Am gegenüberliegenden linken Fügeteilende werden alle Knoten gleichmäßig mit einer Zwangsverschiebung  $u_x$  beaufschlagt und so die Wegsteuerung des Versuchs nachempfunden. Der Mittelknoten der zweiten Auflagerkante wird auch hier in  $y$ -Richtung gelagert.

Die Verschiebung wird in kleinen Lastschritten aufgebracht. Iterativ wird dazu ein Gleichgewichtszustand bestimmt. Die Ergebnisse aus allen Laststufen wurden aufgezeichnet, um eine Auswertung in verschiedenen Beanspruchungsstufen zu ermöglichen.

### 5.2.5 Ergebnisse Modell Zugscherversuch

Die Ergebnisse aus den Zugscherversuchen werden als obere Kraftgrenze in der Berechnung verwendet. Aus den Lastschritten (timesteps) wird derjenige zur Auswertung ausgewählt, dessen Lagerreaktionskräfte der maximalen mittleren Bruchkraft aus der zugehörigen Versuchsserie entspricht. Die Auswertegröße ist die Kraftsumme  $F_x$  aller Knoten am eingespannten Ende des Prüfkörpers. Die errechneten Spannungen werden in den Pfaden (Abb. 5.3) ausgewertet. Die Maximalwerte dienen den Berechnungen an der bauteilähnlichen Geometrie als Vergleichsgrößen (Kap. 5.3). Die Gründe für dieses vereinfachte Vorgehen sind in der Einleitung von Kapitel 5 genannt. Als Vergleichsgröße der interlaminaren Beanspruchung im GFK wird ein einfaches Maximalspannungskriterium gewählt, das den Spannungsvektor aus den interlaminaren Größen  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  beschreibt:

$$\sigma_{ref} = \sqrt{\sigma_y^2 + \tau_{xy}^2} \quad (5.10)$$

Die inneren Ecken der Fügeteilenden an beiden Enden der Überlappung stellen aufgrund des Materialwechsels zum Klebstoff singuläre Stellen dar, an denen keine sinnvolle Auswertung vorgenommen werden kann. Es wird deshalb festgelegt, dass die Auswertung entlang der Klebefuge und der angrenzenden Fügeteilbereiche erst in einem Randabstand beginnt, der der 1,5-fachen Klebschichtdicke entspricht. Nach dem siebten finiten Element mit einem Randabstand in x-Richtung von  $l = 1,5 \cdot 0,14 = 0,196$  mm zum Fügeteilende beginnen demnach die Dehnungs- und Spannungsplots auf den Auswertepfaden (Abb. 5.3 und Anhang E).

An beiden Klebefugenenden wird ein senkrechter Pfad über die Dicke (y-Richtung) zur Auswertung definiert. Weitere senkrechte Pfade sind wegen der Konzentration der Beanspruchungen an den Enden der Überlappung nicht erforderlich. Außerdem werden Ergebnisse auf vier Pfaden (x-Richtung) jeweils ein Element von der Grenzschicht Klebstoff-Fügeteil entfernt ausgewertet. Sie werden aus den Elementlösungen (PLESOL) generiert, die direkt in den Integrationspunkten definiert sind. Im Gegensatz zu den Knotenlösungen erfolgen keine glättenden Interpolationen auf die Elementknoten und Unstetigkeiten als Zeichen einer ungenügenden Netzqualität bleiben sichtbar. Die Daten sind mit hoher Auflösung auf die Pfade geplottet. Über die Modelldicke werden 150 Datenpunkte und parallel zur Klebefuge 72 Datenpunkte je Millimeter Pfad geplottet.

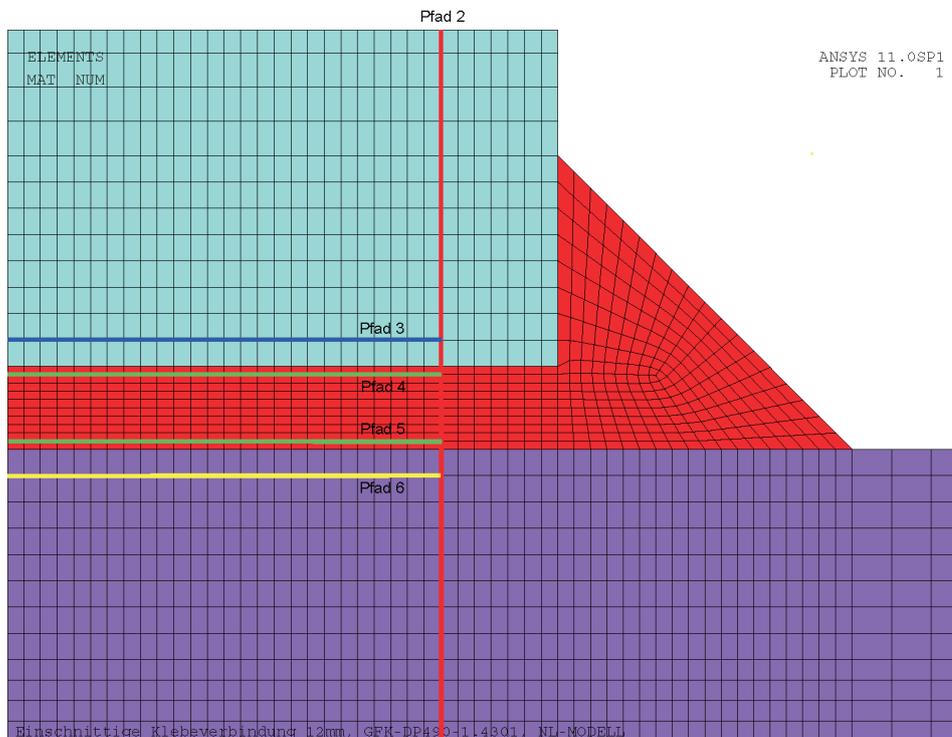
## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen

Die Orte und Bezeichnungen der Pfade können Abb. 5.3 entnommen werden und sind festgelegt mit:

- Pfad 1, 0,196 mm vom Ende der Stahlfügeteiles entfernt,  $\perp$  zur Klebefuge
- Pfad 2, 0,196 mm vom Ende der GFK-Fügeteiles entfernt,  $\perp$  zur Klebefuge
- Pfad 3, im GFK, 0,044 mm von der Grenze GFK-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Klebefuge
- Pfad 4, im Klebstoff, 0,014 mm von der Grenze GFK-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Klebefuge
- Pfad 5, im Klebstoff, 0,014 mm von der Grenze Stahl-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Klebefuge
- Pfad 6, im Stahl, 0,044 mm von der Grenze Stahl-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Klebefuge

Die Auswertung der aufgebrauchten Längsverformung erfolgt entsprechend der Extensometerausgangsmesslänge (Kap. 4.3.7) in einem 28 mm-Bereich, in dem sich mittig die Verklebungsstelle befindet.

Alle Modelle in dieser Arbeit haben die gleiche Ausrichtung zu den Koordinatenrichtungen. Die x-Richtung verläuft parallel zur Klebefuge und entspricht der Richtung des äußeren Kraftangriffs. Die y-Richtung entspricht der Normalen zur Klebefuge bzw. der Probendicke. In z-Richtung besitzen die 2D-Modelle keine Ausdehnung.



**Abb. 5.3:** Netzdetail mit Pfaden der Zugschermodelle

### 5.2.5.1 Zugschermodell DP490-12E

Für die DP490-12E-Zugscherprobe werden in Tab.5.1 die Versuchsergebnisse mit den Größen der Berechnung verglichen. Für die Verformung im Versuch ist ein Bereich angegeben, da die mittlere Kraft-Weg-Kurve am Kraftmaximum ein Plateau ausbildet (Abb.4.27). Der angegebene Weg entspricht der ausgewerteten Verformung für den Kraftbereich mit  $\geq 99\% \cdot F_{max}$ . Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Steifigkeiten der DP490-12E-Zugscherprobe mit den verwendeten Materialparametern ausreichend genau abbilden lassen.

	Versuchsmittelwert	Berechnung
Lagerkraft $F_{max}$	5086 N	5106 N
Verformung auf 28 mm Messlänge bei $F_{max}$	0,178 - 0,205 mm	0,199 mm

**Tabelle 5.1:** Vergleich von Versuchs- und Berechnungsergebnissen DP490-12E

Die für Kunststoffe geeignete Vergleichsspannung (5.6) wird innerhalb der Klebstoffschicht für die am höchsten beanspruchten Randbereiche der Auswertepfade 4 und 5 aus den Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  und  $\sigma_3$  berechnet. Dazu wird zunächst der Wert  $t$  (5.7) als Verhältnis der Schub- und Zugbruchspannung (Tab.4.7, 4.8) des Klebstoffs zu  $t = 24/32 = 0,75$  bestimmt. Für die Pfadrandpunkte mit den höchsten Beanspruchungen ergeben sich Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  im Klebstoff von 42,5 bis 46,6 MPa. Der Höchstwert wurde am Ende von Pfad 4 (im Klebstoff am Ende des GFK) ermittelt. Die Konzentration der Spannungen an den Enden der Überlappung und die unvermeidliche Verdrehung der Zugscherprobe lassen sich am Modellausschnitt mit einem  $\sigma_y$ -Plot für die Iterationsstufe, die der maximalen Versuchslast entspricht, (Abb. 5.4) nachvollziehen.

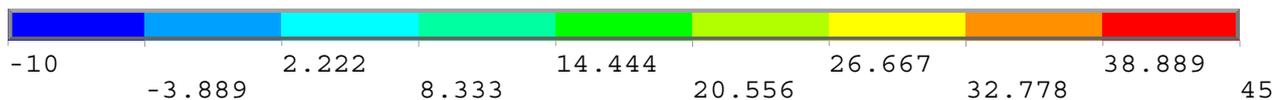
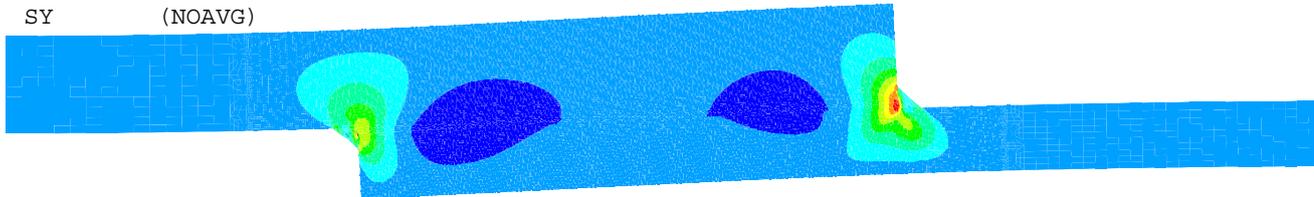
Die berechnete maximale Dickendehnung  $\varepsilon_y = 0,81\%$  (Abb. E.7) im GFK-Fügeteilende liegt über der in der Literatur angegebenen globalen Dehngrenze für den Schädigungsbeginn (Kap.4.4.1), aber mit unter 1% in einer akzeptablen Größenordnung für eine lokal eng begrenzte Beanspruchungsspitze. Im selben Modellbereich (Pfad 2) erreicht die rechnerische interlaminare Zugspannung im GFK lokal einen Wert von  $\sigma_y = 32,8$  MPa (Abb. E.7, E.2). Dieser Wert ist um den Faktor 2,23 größer als die im Versuch ermittelte interlaminare Zugfestigkeit von 14,7 MPa (Kap. 4.4.5).

Ein Delaminationsversagen kann nicht nur durch  $\sigma_y$  allein, sondern auch durch die Kombination mit interlaminaren Schubspannungen hervorgerufen werden. Der maximale Schubspannungswert im GFK im Pfad 2 beträgt  $\tau_{xy} = 22,4$  MPa. Die Verteilung der

## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen

ANSYS 11.0SP1  
ELEMENT SOLUTION

STEP=1  
SUB =136  
TIME=.668457  
SY (NOAVG)

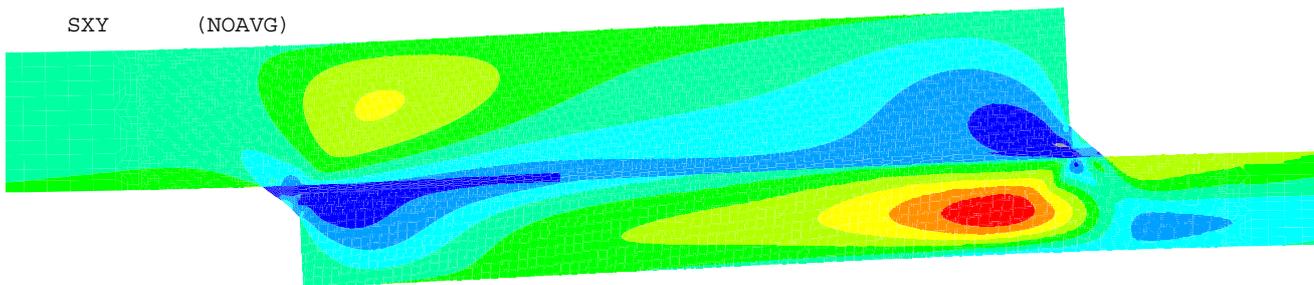


Einschnittige Klebeverbindung 12mm, GFK-DP490-1.4301, NL-MODELL

**Abb. 5.4:**  $\sigma_y$  am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der DP490-12E-Zugscherprobe

ANSYS 11.0SP1  
ELEMENT SOLUTION

STEP=1  
SUB =136  
TIME=.668457  
SXY (NOAVG)



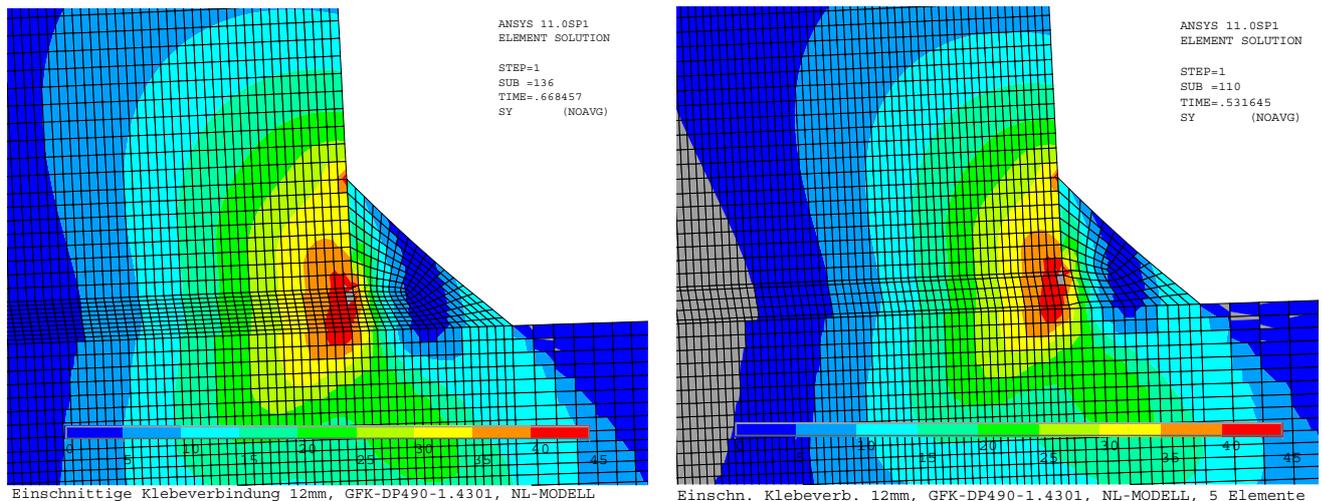
Einschnittige Klebeverbindung 12mm, GFK-DP490-1.4301, NL-MODELL

**Abb. 5.5:**  $\tau_{xy}$  am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der DP490-12E-Zugscherprobe

Schubspannungen  $\tau_{xy}$  unter den Versuchslasten ist in Abb.5.5 dargestellt. Man erkennt gleich hohe Werte an beiden Fügeteilenden, aber eine deutlich ausgeprägtere

Schubbeanspruchung des Klebstoffes vom Ende des steifen Stahlbleches her. Gleiche Spannungswerte sind im Stahl unbedeutend und können im GFK versagenskritisch sein. Aus beiden Spannungsgrößen  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  ergibt sich nach (5.10) im GFK ein  $\sigma_{ref}$  von 39,7 MPa. Die genauen Verläufe der Spannungen und Dehnungen entlang der Pfade können den Darstellungen im Anhang E entnommen werden. Für  $\sigma_y$ - und  $\tau_{xy}$ -Darstellungen befinden sich Detailausschnitte von den Klebschichtenden im Anhang (Abb. E.7 und E.8).

Eine Nachrechnung desselben Modells mit fünf Elementen über die Klebschichtstärke ergab mit sehr guter Übereinstimmung die gleichen Ergebnisse wie das Modell mit zehn Elementen (Abb. 5.6 und Tab. 5.4). Innerhalb der Klebefuge wurden die fünf Elemente über die Dicke so verteilt, dass die Pfade 4 und 5 an gleicher geometrischer Stelle wie beim Ausgangsmodell liegen. Die Randelemente der Klebefuge wurden demnach in ihrer Größe belassen. Die Reaktionskräfte an beiden Modellen unterscheiden sich durch die diskrete Lastschritt-auswertung um -0,51 % und die aufgebracht zugehörigen Verformungen um -0,58 %. Für feinere Lastschrittstufen ist von der Gleichheit der Ergebnisse auszugehen.



**Abb. 5.6:**  $\sigma_y$  (0 bis 45) für DP490-12E - Ende GFK-Fügeteil - Vergleich der Netzfeinheit

### 5.2.5.2 Zugschermmodell SI330-12E

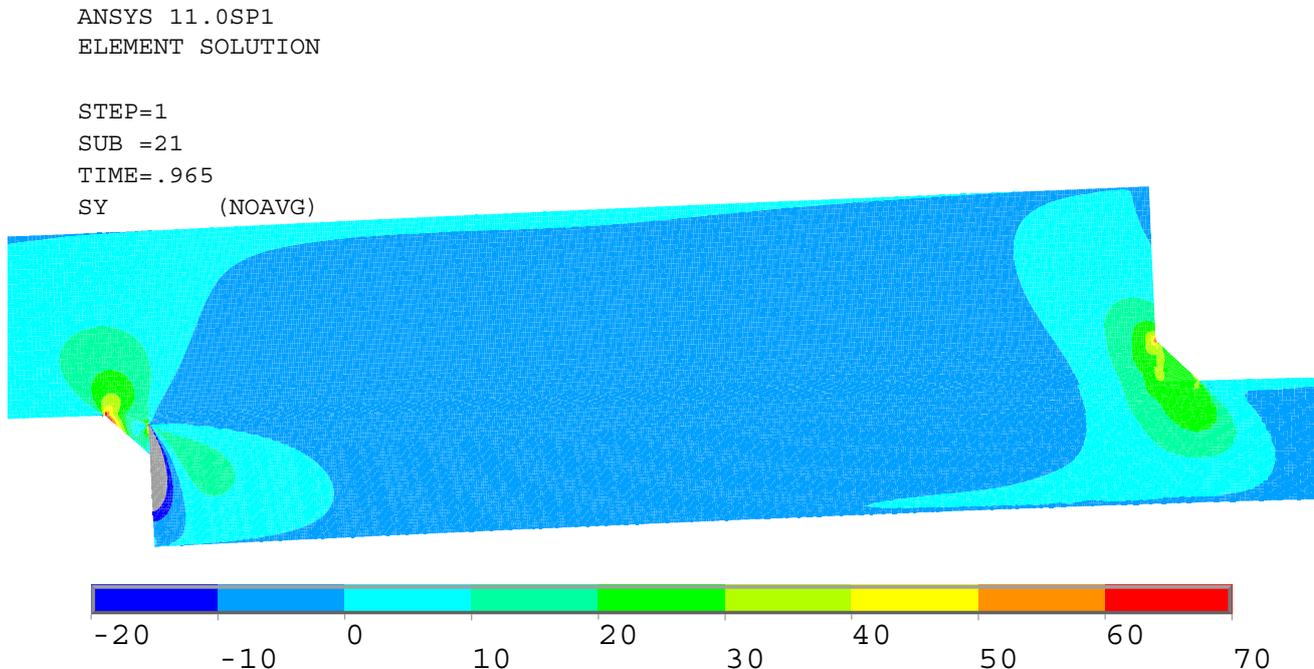
In der Nachrechnung der 12 mm-Zugschergeometrie wird das Verformungsverhalten unter Verwendung eines linearen Materialmodells für den Klebstoff SI330 mit Erreichen der unteren Längsverformungsgrenze aus den Versuchen etwas zu steif abgebildet (Tab.5.2). Das nichtlineare Materialverhalten des Stahlbleches und die geometrische Nichtlinearität des gesamten Modells werden vergleichbar zur Probe DP490-12E beibehalten. Die Bilder 5.7 und 5.8 zeigen die  $\sigma_y$ - und  $\tau_{xy}$ -Spannungen zu den Ergebniswerten aus Tabelle 5.2. Detailplots und die Pfadauswertungen sind im Anhang E zu finden. Die Vergleichsspannungen

## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen

$\sigma_v$  im Klebstoff nach (5.6) (mit  $t=0,75$  analog DP490) sind am Ende des Stahlfügeteils besonders hoch. Mit 89,2 MPa (Anfang Pfad 4) und 93,4 MPa (Anfang Pfad 5) liegt die höchste Klebstoffbeanspruchung nicht mehr am Ende des GFK-Fügeteils. Damit lassen sich auch die Mischbrüche beim SI330 erklären, bei denen teilweise adhäsives Ablösen des Klebstoffs vom Stahl beobachtet werden konnte (Abb. 4.31).

	Versuchsmittelwert	Berechnung
Lagerkraft $F_{max}$	4943 N	4890 N
Verformung auf 28 mm Messlänge bei $F_{max}$	0,168 - 0,22 mm	0,162 mm

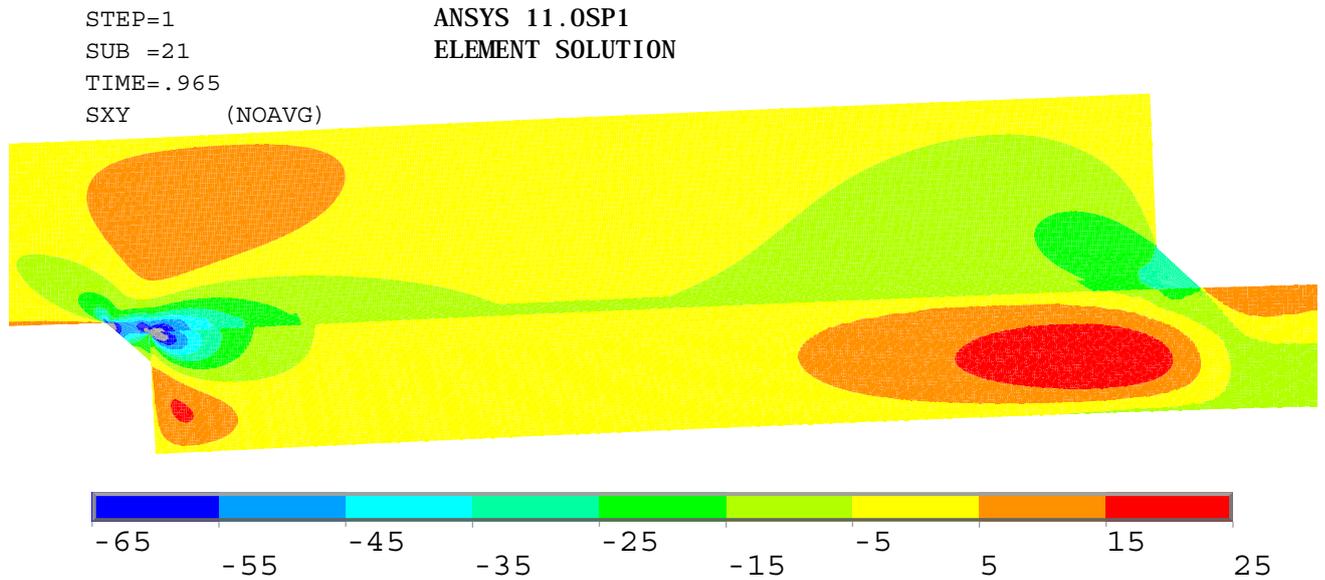
**Tabelle 5.2:** Vergleich von Versuchs- und Berechnungsergebnissen SI330-12E



Einschnittige Klebeverbindung 12mm, GFK-SI330-1.4301, NL-MODELL

**Abb. 5.7:**  $\sigma_y$  am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der SI330-12E-Zugscherprobe

Am GFK-Ende ergeben sich im Klebstoff mit 48,4 MPa (Ende Pfad 4) und 45,5 MPa (Ende Pfad 5) vergleichbare Werte wie im DP490-12E-Modell (Kap. 5.2.5.1). Im GFK sind die maximalen interlaminaren Beanspruchungen im Pfad 2  $\sigma_y = 25,1$  MPa,  $\varepsilon_y = 0,47\%$ ,  $\tau_{xy} = 26,2$  MPa und im Pfad 1  $\sigma_y = 6,4$  MPa,  $\varepsilon_y = -1,1\%$  (Abb. E.9, E.10, E.15 und E.16) und bleiben damit unter den mit DP490 ermittelten Werten. Die Referenzspannung (5.10) im GFK ergibt sich für Pfad 2 zu  $\sigma_{ref} = 36,3$  MPa. Die höchsten Beanspruchungen entstehen durch den steifen Klebstoff allerdings außerhalb der dünnen Klebefuge am linken Klebstoffkeil, Abb. 5.7 und 5.8. Die höhere Steifigkeit und der lineare Materialansatz führen im Modell,



Einschnittige Klebeverbindung 12mm, GFK-SI330-1.4301, NL-MODELL

**Abb. 5.8:**  $\tau_{xy}$  am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der SI330-12E-Zugscherprobe

im Gegensatz zum DP490, zu einem Mittragen der Klebstoffrandkeile (Abb. E.15 und E.16). Da die maximalen Beanspruchungen in den Klebekeilen am Ende der Klebefuge angetroffen werden, ist zu erwarten, dass die Ausformung und Größe des Klebekeiles in diesem Modell einen Einfluss auf die berechneten Spannungen haben wird.

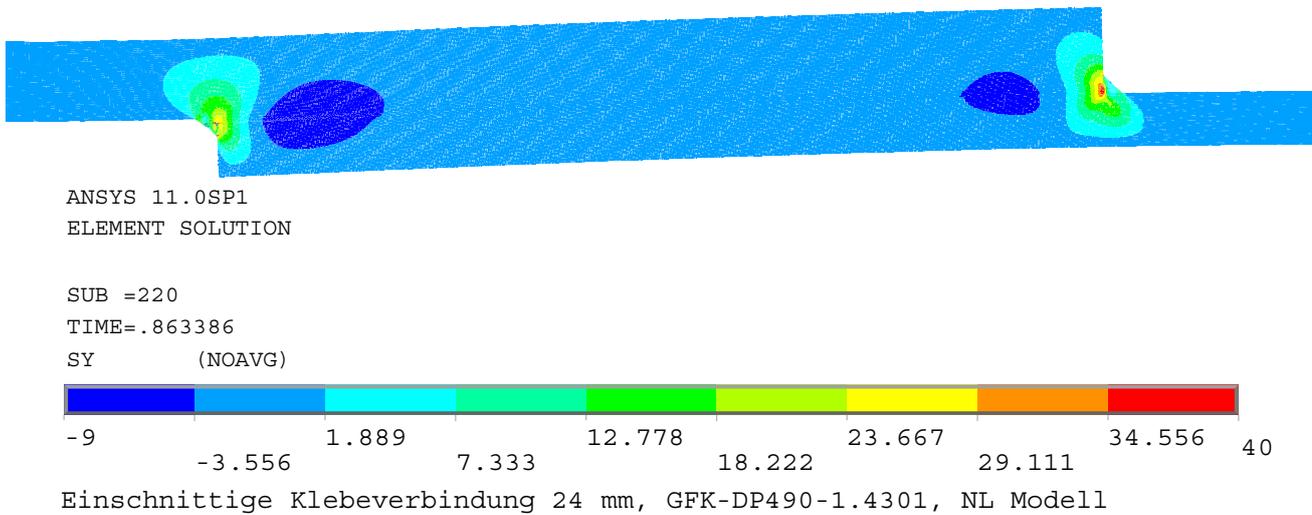
### 5.2.5.3 Zugschermodell DP490-24E

Die Nachrechnung der Zugscherprobe DP490-24E mit doppelter Überlappungslänge und dem Klebstoff DP490 mit nichtlinearem Materialansatz ergibt ein steiferes Verhalten gegenüber dem Versuch (Tab. 5.3, Abb. 4.28). Für die vier Pfadrandpunkte ergeben sich nach (5.6) Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  im Klebstoff von 35,7 bis 43,0 MPa. Der Höchstwert wurde am Anfang von Pfad 4 (Ende Stahl) ermittelt. Trotz höherer Vergleichsspannung im Klebstoff am Stahlende ergibt sich die höchste Zugspannung in Dickenrichtung des Laminates am Ende des GFK-Fügeteils. Im Pfad 2 im GFK wurden die Maximalwerte  $\varepsilon_y = 0,56\%$ ,  $\sigma_y = 28,2$  MPa, und  $\tau_{xy} = 20,7$  MPa bestimmt und daraus nach (5.10) die Auswertegröße  $\sigma_{ref} = 35,0$  MPa abgeleitet.

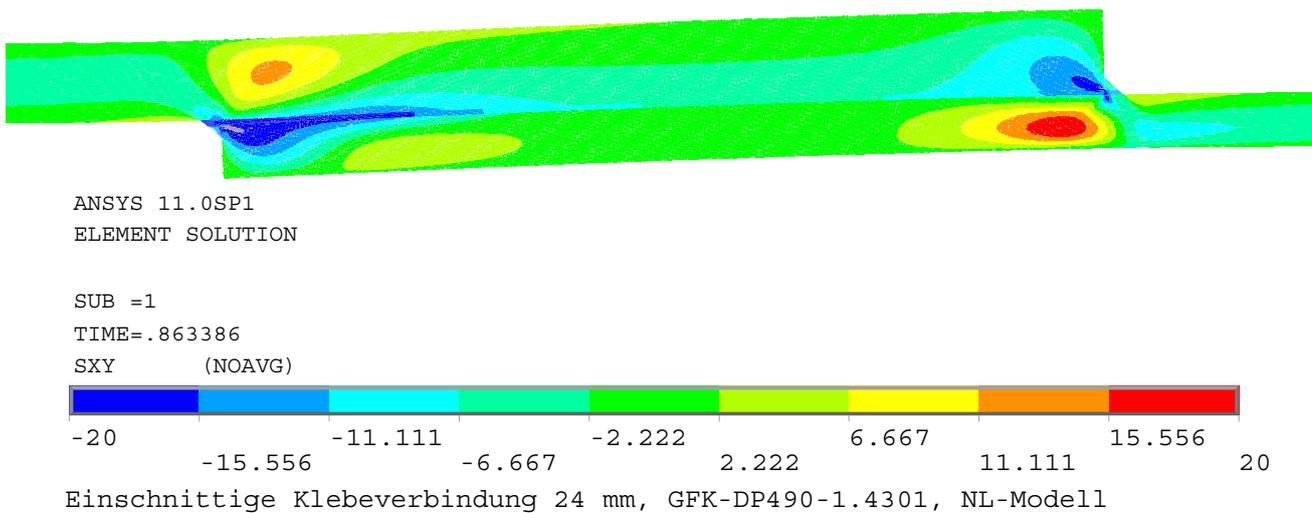
	Versuchsmittelwert	Berechnung
Lagerkraft $F_{max}$	6866 N	6859 N
Verformung auf 28 mm Messlänge bei $F_{max}$	0,2 - 0,25 mm	0,168 mm

**Tabelle 5.3:** Vergleich von Versuchs- und Berechnungsergebnissen DP490-24E

## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen



**Abb. 5.9:**  $\sigma_y$  am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der DP490-24E-Zugscherprobe



**Abb. 5.10:**  $\tau_{xy}$  am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der DP490-24E-Zugscherprobe

### 5.2.5.4 Zusammenfassung Zugschermodelle

Die einschnittig überlappten Klebeverbindungen übertragen die Kräfte trotz nicht linearer Klebstoffeigenschaften vornehmlich an den Überlappungsenden, Abb. E.4. Es genügt eine Spannungsauswertung nah an den Fügeteilenden. In den Berechnungen werden die Auswertungen einheitlich in einem Randabstand in x-Richtung von 0,2 mm entsprechend 1,5-facher Klebefugendicke vorgenommen und damit die numerische Singularität am Fügeteilende umgangen. Die verschiedenen Nachrechnungen der Versuchsergebnisse

ergeben für die versagenauslösenden Spannungskomponenten  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  sowie die daraus abgeleitete Größe  $\sigma_{ref}$  im GFK annähernd übereinstimmende Werte. Tabelle 5.4 stellt die Ergebnisgrößen aus den Zugschermodellen zusammen.

Probe	$\sigma_v$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	$\sigma_{ref}$
	Klebstoff	GFK	GFK	GFK
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
DP490-12E, NL	46,6	32,8	22,4	39,7
DP490-12E-5Elem, NL	46,4	32,7	22,5	39,7
SI330-12E, linear	93,4	25,1	26,2	36,3
DP490-24E, NL	43,0	28,2	20,7	35,0
Ansatz für DP490-Bauteilgeometrie	44,8	30,5	21,6	37,4

**Tabelle 5.4:** Vergleichspannung der Klebstoffe und interlaminare Spannungsgrößen der berechneten Zugschermodelle im Pfad 2 am Ende des GFK-Fügeteils

Für die Betrachtung der genannten Auswertegrößen genügt eine Reduzierung der anfänglichen Diskretisierung der Klebefuge von zehn auf fünf Elemente über die Höhe. Die absoluten Spannungsgrößen aus den Pfadauswertungen unter Aufprägung der Versuchsbruchlasten liegen über den Spannungsgrenzwerten aus den Zugversuchen der Grundwerkstoffe und werden ausschließlich als Grenzkriterium in vergleichende Berechnungen unter gleichen Modellierungsrandbedingungen, aber veränderter Geometrie übertragen. Der besonders hohe Vergleichsspannungswert in der Klebschicht für den SI330 liegt im linearen Materialansatz begründet. Die rechnerischen Auswertegrößen (Schlusszeile in Tab. 5.4) werden als Mittelwert aus den Ergebnissen der 12 und 24 mm überlappten Zugscherprobe mit dem Klebstoff DP490 bestimmt.

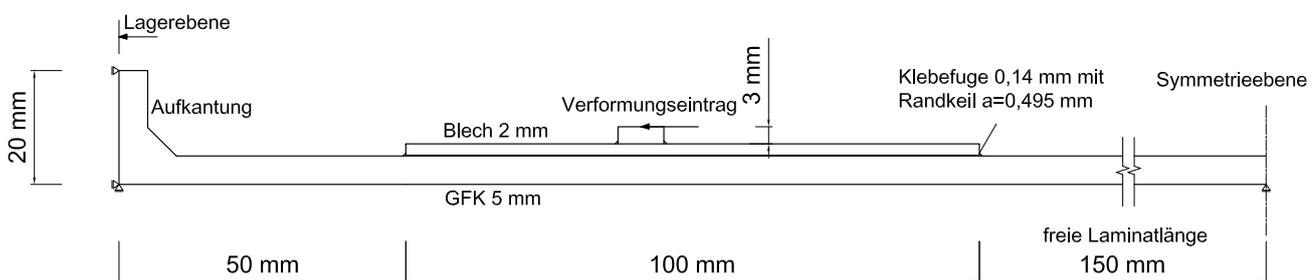
$\sigma_{ref}$  und  $\sigma_v$  bestimmen sich nach den Versuchsbruchlasten. Im Versuch versagte das GFK, sodass  $\sigma_v$  für den Klebstoff unter den Randbedingungen des Versuches eine Maximalgröße darstellt, die unter anderen Geometriebedingungen (z.B. anderes Fügeteilmaterial) noch nicht den Bruchbeginn bedeuten muss. Da sich die Reserve der den Klebstoffbruch auslösenden Spannung nicht beziffern lässt, wird auf deren Ausnutzung verzichtet, auch wenn in anderen Fällen die  $\sigma_v$ -Grenze (Klebstoff) vor dem  $\sigma_{ref}$ -Kriterium (GFK) erreicht wird.

### 5.3 FE-Modell eines realitätsnahen Kraftanschlusspunktes

Die berechneten Spannungsmaximalwerte,  $\sigma_v$  für die Klebstoffe und  $\sigma_{ref}$  für das GFK, aus den berechneten Zugscherversuchen dienen in der Parameterstudie an einem realitätsnahen Kraftanschlusspunkt als Abbruchgrenzen für die Berechnung. Die betrachtete Geometrie besteht aus einem Lastanschlussblech, das über eine Verklebung mit dem nicht linear-elastischen Klebstoff DP490 mit einer schalenartigen GFK-Struktur verbunden ist. In einer Variante der Berechnung wird ein Vergleich zum steiferen Klebstoff SI330 gezogen. Die iterativen Berechnungen unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten in Geometrie und Material werden für die Lastschritte ausgewertet, die eines der Abbruchkriterien  $\sigma_v$  oder  $\sigma_{ref}$  (Tab. 5.4) erreichen.

#### 5.3.1 Geometrie des Anschlusspunktes

Der Kraftanschlusspunkt wird nah am Rand einer GFK-Struktur platziert. Die Kraft wirkt laminatparallel in Richtung der Bauteilrandaufkantung. Der verformungsgesteuerte Lasteintrag erfolgt in seiner Wirkungsebene 3 mm oberhalb und parallel zum aufgeklebten Blech, so wie es das Fußblech eines aufgesetzten Verbindungsmittels eintragen würde. Neben dieser Veränderung im Lasteintrag gibt es im Vergleich zu den Zugscherproben noch den entscheidenden Unterschied, dass das GFK nicht am Rand der Klebeverbindung endet (Abb.5.11) und der Lasteintrag inmitten des Verklebungsbereiches erfolgt. Dazu wird im Modell ein Sockel über dem Blech modelliert, der einer Knagge, einer Leiste bzw. einem oder mehreren M8-Gewindebolzen entspricht.



**Abb. 5.11:** Grundgeometrie des realitätsnahen Kraftanschlusspunktes VAR01

Über die Höhe der Aufkantung erfolgt eine horizontale Lagerung zu einer anzubindenden Struktur. An der Aufkantung ändern sich die Richtungen der GFK-Materialeigenschaften entsprechend der veränderten Laminatrichtung.

### 5.3 FE-Modell eines realitätsnahen Kraftanschlusspunktes

Die gewählte Modellgeometrie kann durch die 2D-Abstrahierung in verschiedene bauliche Anschlusslösungen „hineingelegt“ werden. Ziel der Berechnungen ist die Analyse zu den Einflüssen der verschiedenen Geometrieparameter auf die Beanspruchungen in der Klebefuge bzw. im delaminationsgefährdeten Faserverbundkunststoff und die Ermittlung der rechnerischen Bruchkraft für verschiedene Geometrievarianten.

Die Ausgangsgeometrie verwendet die folgenden Geometriekennwerte (Abb. 5.11):

- Blechdicke 2,0 mm,
- Blechlänge 100 mm,
- Laminatdicke 5 mm,
- Höhe Randaufkantung des Laminates 20 mm,
- Abstand zwischen Blech und Außenkante der Aufkantung 50 mm,
- freie Laminatlänge zwischen Blech und Symmetrierandbedingung rechts 150 mm und
- Lasteintragung lokal mittig auf dem Blech und 3 mm über Oberkante Blech mittels 8 mm breitem Sockel.

Ausgehend von der Basisgeometrie soll in einer Parameterstudie der Einfluss einzelner Geometrieparameter auf die Tragfähigkeit des geklebten Lasteinleitungspunktes geprüft werden. Einen Überblick zum Analyseprogramm gibt Tabelle 5.5. Die vergleichende Untersuchung beschränkt sich auf diskret gewählte Varianten. Abschließend wird eine Kombination der Einzelparameter vorgeschlagen und analysiert, mit dem Ziel einer möglichst hohen Tragfähigkeit der Klebeverbindung.

Für das Analyseprogramm wurden die Wertepaare eines Parameters so gewählt, dass der Einfluss auf die maximal realisierbare Auflagerkraft deutlich erkennbar wird. Die Parameter bleiben dabei in technisch sinnvollen Grenzen. Das Blech benötigt eine Mindestdicke (2 mm) um eine Schweißbarkeit der Lasteinleitung zu ermöglichen. Für punktuelle Lasteinleitungen in Form von Gewindebolzen kann im Gegensatz zu linienförmigen Knaggen eine höhere Blechdicke erforderlich werden (4 mm). Das Laminat kann hohe Membranspannungen ertragen. Als ideale Schale oder Membrankonstruktion kann eine dünne Laminatdicke (5 mm) ausreichend sein. Durch Randstörungen, ungleichmäßige Belastung, Beulanforderungen und Abweichung von idealen Schalenformen kann eine höhere Plattensteifigkeit nötig sein (10 mm). Wirtschaftlich werden die dicken Lamine auch als Sandwichstrukturen ausgeführt. Sie werden in diesem Analyseprogramm nicht betrachtet, da das Verbundverhalten zwischen Kern und Decklage bekannt sein muss.

## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen

Parameter	Wert [mm]	Variante									
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Blechdicke	2	×		×	×	×	×	×	×	×	×
	4		×								
Laminatdicke	5	×	×		×	×	×	×	×	×	
	10			×							×
Klebschichtdicke	0,14	×	×	×		×	×	×	×	×	×
	0,28				×						
Blechlänge	100	×	×	×	×		×	×	×	×	
	50					×					×
Klebstoff- steifigkeit	DP490	×	×	×	×	×		×	×	×	×
	SI330						×				
Lastangriff	mittig	×	×	×	×	×	×		×	×	
	vorn							×			×
Blechvoute	keine	×	×	×	×	×	×	×		×	
	innen								×		×
freie Laminatlänge	150	×	×	×	×	×	×	×	×		×
	50									×	

**Tabelle 5.5:** Analyseprogramm zum realitätsnahen Kraftanschlusspunkt

Ideale Klebschichtfestigkeiten von hochtragfähigen Strukturverklebungen werden für Schichtdicken unter 0,15 mm [3] erwartet (Kap. 2.9.4). Unter der Annahme, dass die Eigenfestigkeit des Klebstoffes unverändert bleibt, wird der Einfluss der Verdopplung der Klebschichtdicke mit Blick auf die Herstellungsgenauigkeit mit erfasst. Bei der Verwendung rechteckiger Anschlussbleche (z.B. 100 × 50 mm) ist die Entscheidung zum Einbau längs oder quer zur Belastungsrichtung bei gleicher Klebfläche zu treffen. Aus den Erfahrungen anderer Autoren, z.B. [14], kann die Entscheidung zum Quereinbau vorweggenommen werden. Je nach Konstruktion des aufgesetzten Verbindungsmittels kann dennoch ein Längseinbau erforderlich sein. Die Auswirkungen der Blechausrichtung werden in Variante fünf erkennbar. Das Blech wird dazu symmetrisch von beiden Seiten gekürzt.

Unterschiedliche Klebstoffsteifigkeit wird über die beiden geeigneten Klebstoffsysteme DP490 und SI330 (Kap. 4.3, 5.2) berücksichtigt. Der exzentrische Lastangriff und die Unsymmetrie der einschnittigen Verklebung erzeugen ein Anschlussmoment, das Schälbeanspruchungen hervorruft. Um im abhebenden Bereich unter dem Blech möglichst viel Klebefläche zur Verfügung zu stellen, wird neben der mittigen Lasteinleitung eine Verschiebung in den

vorderen Viertelpunkt des Bleches betrachtet.

Der erwarteten Konzentration der Beanspruchungen an den Steifigkeitssprüngen an den Rändern der Verklebung wird über innenliegende Blechvouten mit einer Vervielfachung der Klebschichtdicke und damit verbundener Erhöhung der Verformbarkeit und Reduzierung der Beanspruchungsspitzen im Klebstoff [46, 48] und im GFK Rechnung getragen. Die Voute beginnt mit einem Randabstand von 10 mm und besitzt ein Steigungsverhältnis von 1:10. Die Klebschichtdicke vergrößert sich am Rand um 1,0 mm (Abb. 5.33).

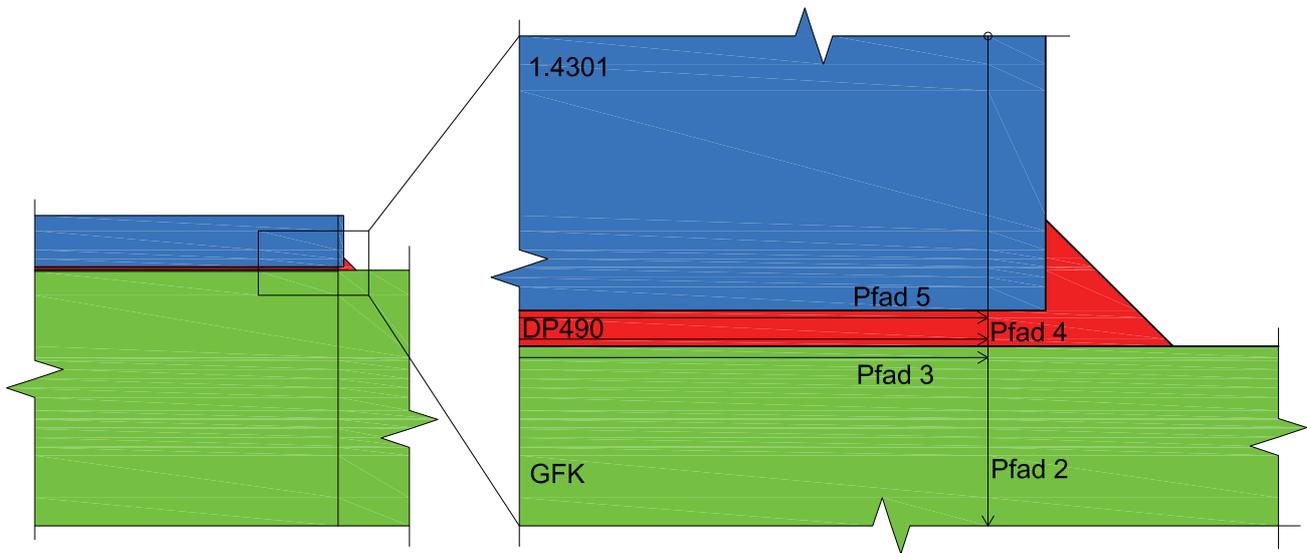
Die reale räumliche Steifigkeit um den Lastanschlusspunkt in der GFK-Struktur ist von den Krümmungen der Schalengeometrie, der Laminatdicke und aussteifenden Maßnahmen, wie z.B. Rippen, sowie der Positionierung des Bleches, z.B. im Eckbereich des Bauteils oder entlang einer geraden Randkante, abhängig. Die Reduzierung der Laminatverbiegung durch die Biegesteifigkeit der umgebenden Laminatbereiche kann nur ansatzweise in der Berechnung berücksichtigt werden. Über die Wahl der freien Laminatlänge zwischen Blech und rechter Symmetrie- und Lagerbedingung kann Einfluss auf die Anschlusssteifigkeit und somit auf die Verdrehungen infolge des unvermeidlichen Anschlussmomentes genommen werden. Eine steifere Variante wird exemplarisch in Variante neun untersucht.

#### 5.3.2 Modellbeschreibung zum Kraftanschlusspunkt

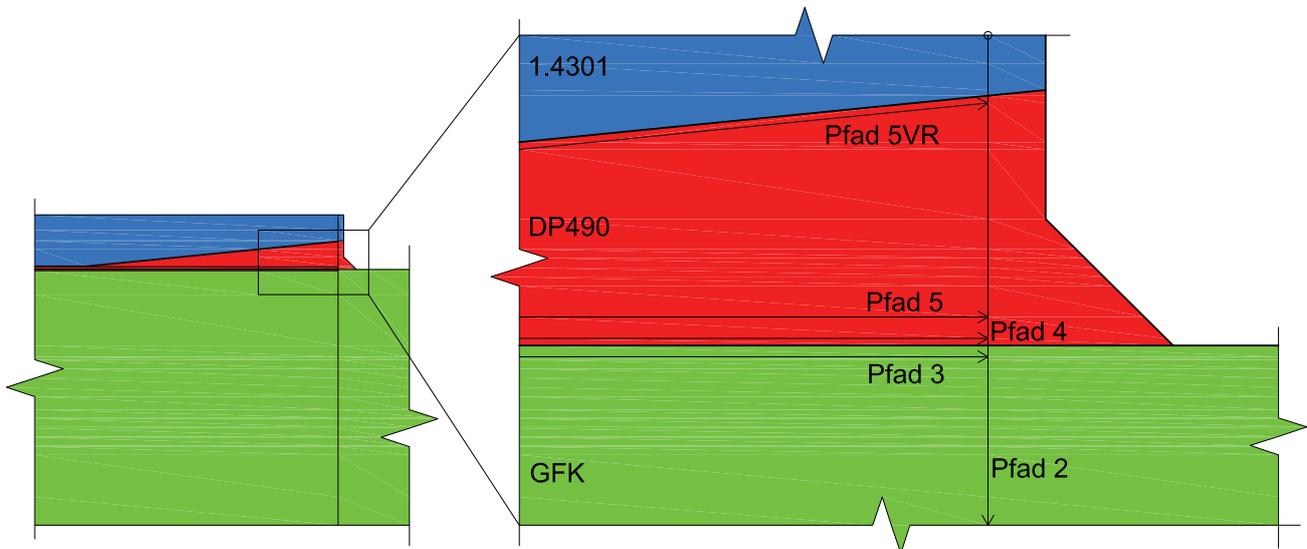
Die Lagerung im 2D-Modell erfolgt links an der Außenfläche der Aufkantung über eine Unverschieblichkeit aller Knoten in x-Richtung und eines Knotens in y-Richtung. Auf der Gegenseite wird der Anschluss an das weiterführende Laminat über eine Symmetriebedingung definiert. Zusätzlich wird ein Knoten in y-Richtung gehalten. Der rechte Symmetrierand besitzt somit eine Biegesteifigkeit und bleibt in x-Richtung verschiebbar. Die horizontalen Auflagerkräfte entstehen allein an der Aufkantung.

Wie mit einer Modellvariante der DP490-12E-Zugscherberechnung gezeigt werden konnte, genügt eine Modellierung mit fünf Elementen über die Klebschichtdicke (Tab. 5.4). Diese Vergrößerung des Modells spart wesentlich Ressourcen.

Im Gegensatz zu den Modellen der Zugscherversuche befindet sich das Blech auf dem GFK. Dadurch werden die Längspfade 3 - 5 (x-Richtung) in ihrer Reihenfolge von unten nach oben durch das Modell gelegt (Abb. 5.12). Für die Geometrievariante mit verkürzter Blechlänge werden die Pfade 3 - 5 kürzer und die Pfade 1 und 2 behalten ihre Lage mit festem Abstand relativ zu den Rändern und verschieben sich global mit den seitlichen Blechkanten. Die Pfade beginnen links und enden rechts (3 - 5) bzw. gehen von oben nach unten (1 und 2).



**Abb. 5.12:** Pfaddefinition am realitätsnahen Kraftanschlusspunkt am rechten Blechrand (VAR01-07, VAR09)



**Abb. 5.13:** Pfaddefinition am realitätsnahen Kraftanschlusspunkt an rechter Blechvoute (VAR08, VAR10)

Bei veränderten Dicken der Füge­teile oder der Klebeschicht bleibt der Abstand zur Kante mit dem Materialwechsel erhalten (3-5). Auf eine Auswertung im Stahlblech wurde verzichtet, da dort keine kritischen Beanspruchungszustände entstehen. An Blechen mit Voute wird zusätzlich von Pfad 5 ein Zweig im Klebstoff parallel zur Blechkante mitgeführt (Abb. 5.13).

Für die Variantenuntersuchung an der bauteilähnlichen Geometrie werden folgende Auswertepfade verwendet:

- Pfad 1, 0,224 mm vom linken Ende des Stahlfügeteiles entfernt,  $\perp$  zur Klebefuge,
- Pfad 2, 0,224 mm vom rechten Ende des Stahlfügeteiles entfernt,  $\perp$  zur Klebefuge,
- Pfad 3, im GFK, 0,044 mm von der Grenze GFK-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Klebefuge,
- Pfad 4, im Klebstoff, 0,028 mm von der Grenze GFK-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Klebefuge,
- Pfad 5, im Klebstoff, 0,028 mm von der Grenze Stahl-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Klebefuge,
- Pfad 5VL, Teilpfad in gevouteter Klebefuge im Klebstoff, im linken 10 mm-Voutenbereich, 0,028 mm von der Grenze Stahl-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Voutenschräge und
- Pfad 5VR, Teilpfad in gevouteter Klebefuge im Klebstoff, im rechten 10 mm-Voutenbereich, 0,028 mm von der Grenze Stahl-Klebstoff entfernt,  $\parallel$  zur Voutenschräge.

### 5.3.3 Ergebnisdarstellung Variantenuntersuchung

Die einzelnen Modellvarianten werden über die Spannungskriterien ausgewertet und die zugehörigen Auflagerkräfte quantitativ in Tab. 5.6 verglichen. Gegenüber der Basisvariante VAR01 bewirken alle betrachteten Maßnahmen, bis auf die Erhöhung der Blechdicke, eine Steigerung der Auflagerkraft.

Die Sensitivität der Auswertekriterien kann durch den Auftrag der Auflagerkraft über die Spannungsentwicklungen belegt werden (Abb. 5.14).

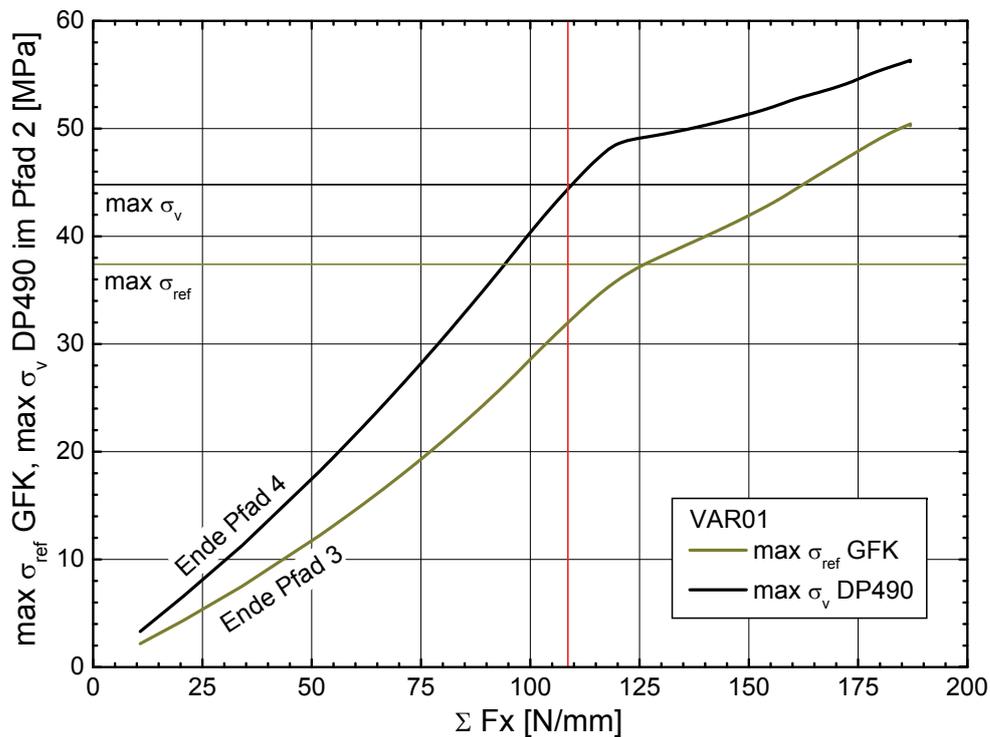
Die nachfolgenden Bilder zeigen für alle Geometrievarianten die Spannungskomponenten  $\tau_{xy}$  und  $\sigma_y$  im Bereich der Verklebung für das ausgewertete maximale Lastniveau (Tab. 5.6). Der Darstellungsbereich der Spannungsverteilung wurde so gewählt, dass im Klebstoff und im GFK die Verteilungen gut nachvollziehbar sind. Örtlich höhere Stahlspannungen liegen außerhalb der Darstellungsbereiche und erscheinen als graue Flächen.

Von den Spannungskriterien zum Abbruch der Berechnungen erreicht in allen Varianten der bauteilähnlichen Geometrien zuerst die Vergleichsspannung im Klebstoff (Abb. 5.14 und Tab. 5.6) den Grenzwert aus der Nachrechnung der Zugscherversuche. Bei der Definition der Kriterien aus den zugehörigen Zugscherversuchen limitierte der Bruch im GFK die Tragfähigkeit. Der Klebstoff besitzt eine Reserve, die bei dem vorgeschlagenen Vorgehen unberücksichtigt bleibt (Kap. 5.2.5.4).

## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen

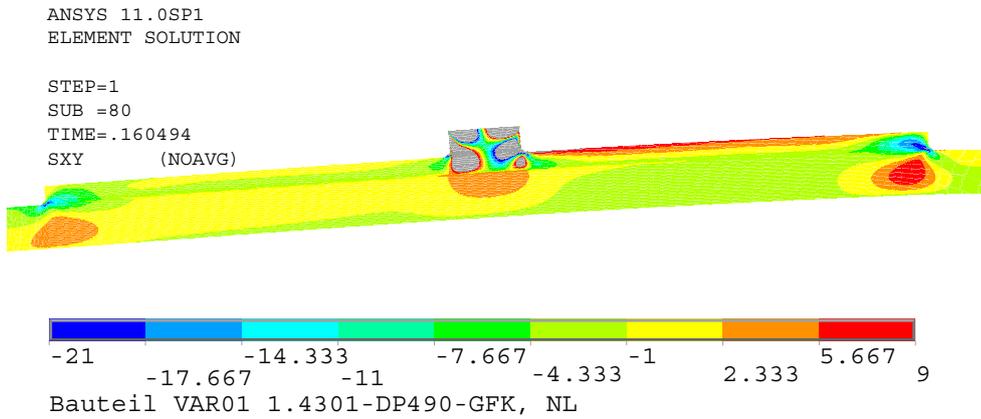
Parameter	Einh.	Variante								
		01	02	03	04	05	06	07	08	09
max. $u_x$ Lasteinleitung	mm	0,802	0,677	0,932	0,972	0,958	1,165	0,879	2,235	0,590
max. $\Sigma F_x$ am Auflager	N/mm	108,6	82,7	470,0	119,3	92,4	136,0	129,8	168,2	259,9
max. $\Sigma F_y$ am Auflager	N/mm	4,87	4,16	24,95	5,64	3,91	6,78	4,87	10,50	15,61
$\sigma_{ref}$ GFK (5.10) Pfad 2	MPa	31,97	35,74	32,73	31,34	29,42	30,51	30,48	27,23	32,43
$\sigma_v$ Klebstoff (5.6) Pfad 2	MPa	44,95	44,79	44,80	44,52	44,77	91,17	44,80	44,63	44,82
$\Delta \Sigma F_x$ Bezug: VAR01 u. gleiche Klebläche	%	0,0	-23,8	+332,8	+9,8	+70,2	+25,2	+19,5	+54,9	+139,3

**Tabelle 5.6:** Ergebnisse der Variantenstudie der realitätsnahen Bauteilgeometrie

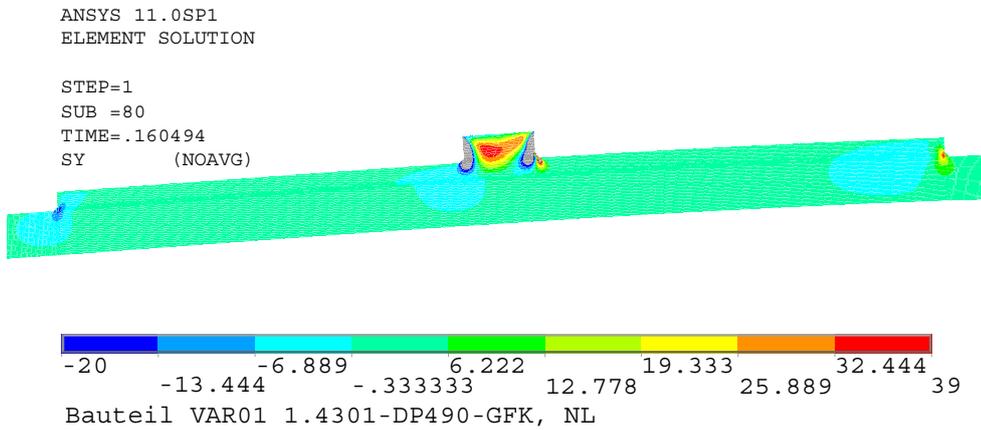


**Abb. 5.14:** Entwicklung der Auflagerkräfte über  $\max \sigma_{ref}$  im GFK und  $\max \sigma_v$  im DP490 in der Grundvariante VAR01

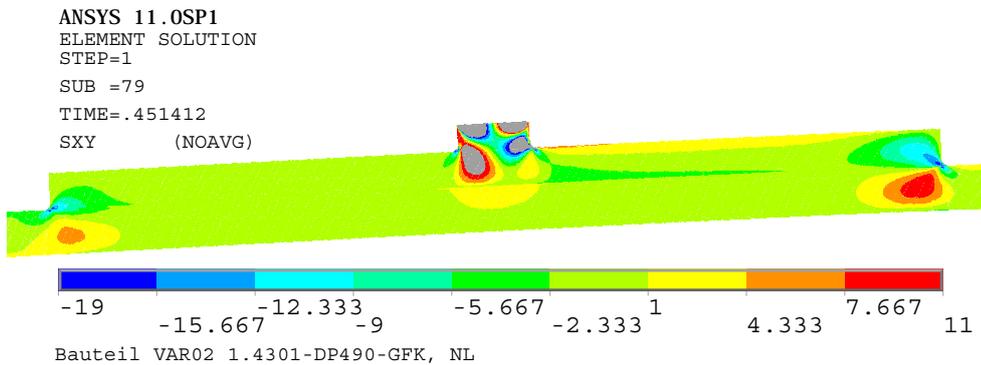
### 5.3 FE-Modell eines realitätsnahen Kraftanschlusspunktes



**Abb. 5.15:**  $\tau_{xy}$  (-22 bis 9) für VAR01 - Grundvariante

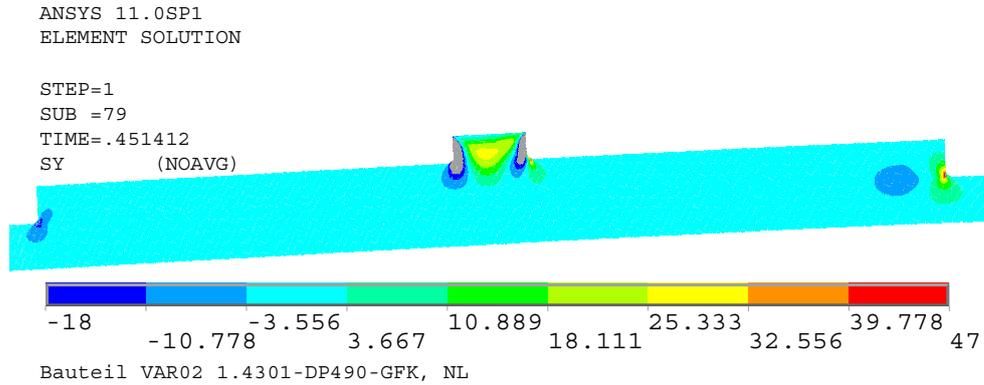


**Abb. 5.16:**  $\sigma_y$  (-20 bis 39) für VAR01 - Grundvariante

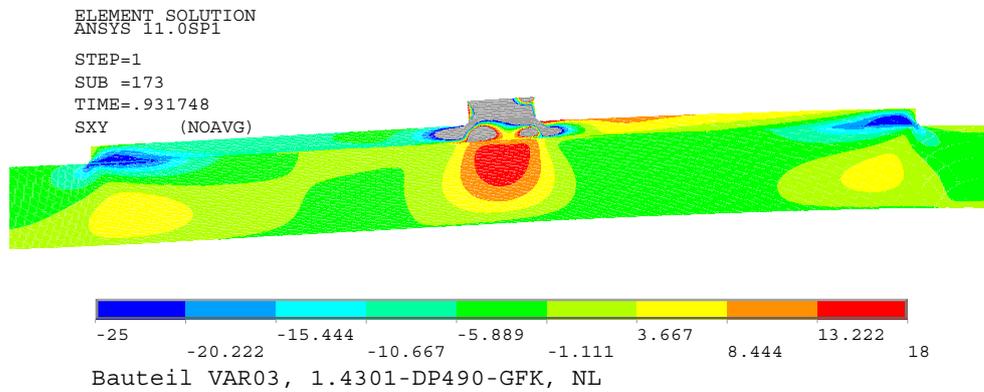


**Abb. 5.17:**  $\tau_{xy}$  (-19 bis 11) für VAR02 - Blechdicke 4 mm

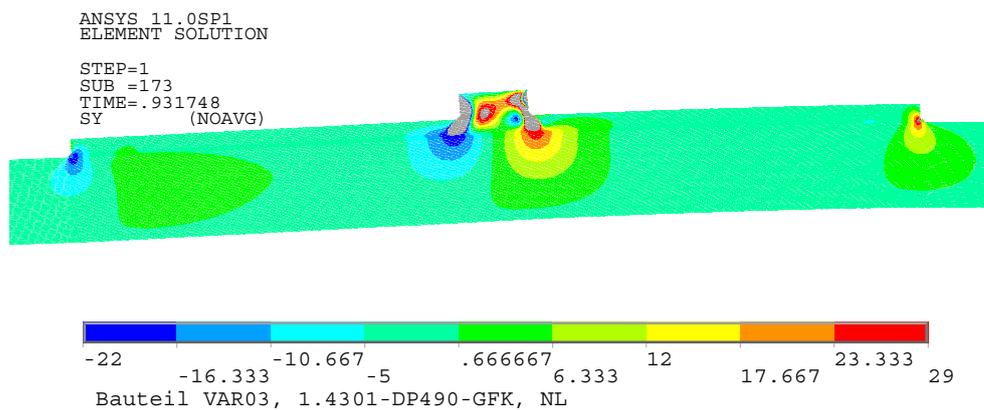
## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen



**Abb. 5.18:**  $\sigma_y$  (-18 bis 47) für VAR02 - Blechdicke 4 mm

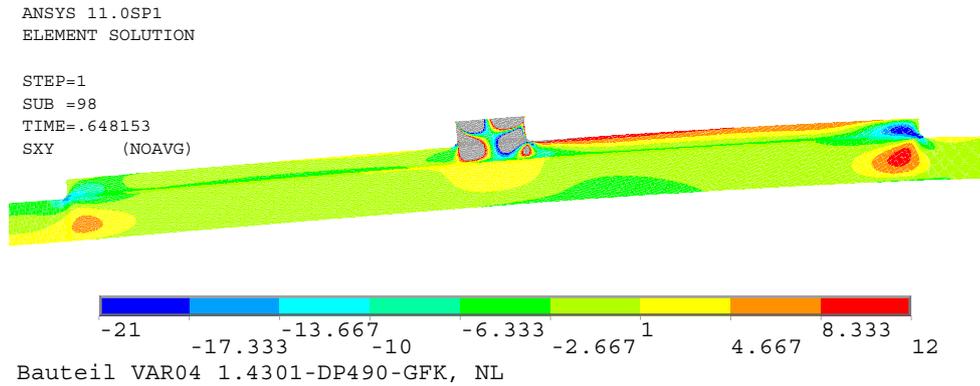


**Abb. 5.19:**  $\tau_{xy}$  (-25 bis 18) für VAR03 - Laminatdicke 10 mm

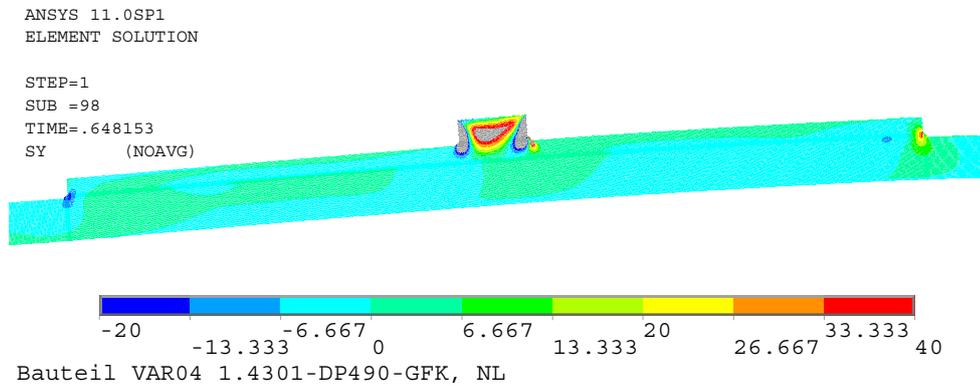


**Abb. 5.20:**  $\sigma_y$  (-22 bis 29) für VAR03 - Laminatdicke 10 mm

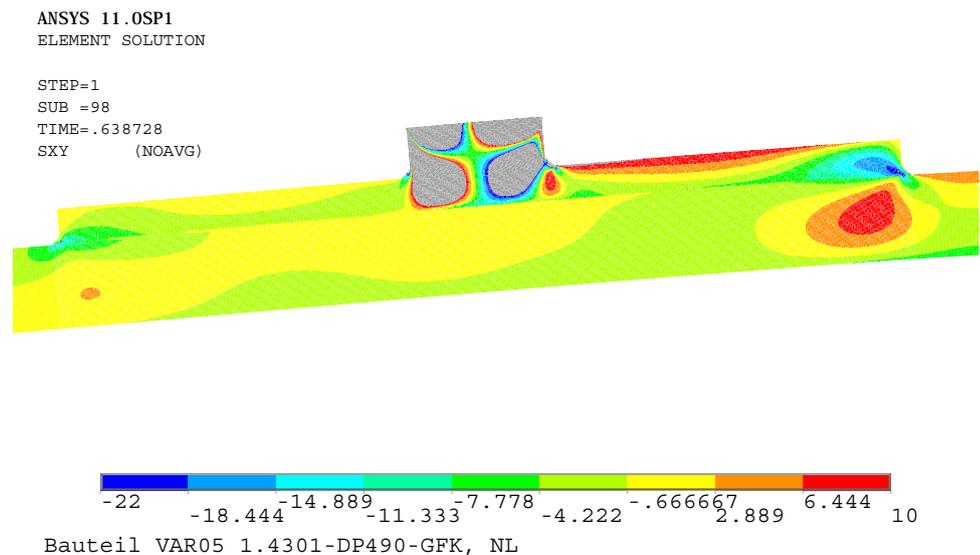
### 5.3 FE-Modell eines realitätsnahen Kraftanschlusspunktes



**Abb. 5.21:**  $\tau_{xy}$  (-21 bis 12) für VAR04 - Klebschichtdicke 0,28 mm

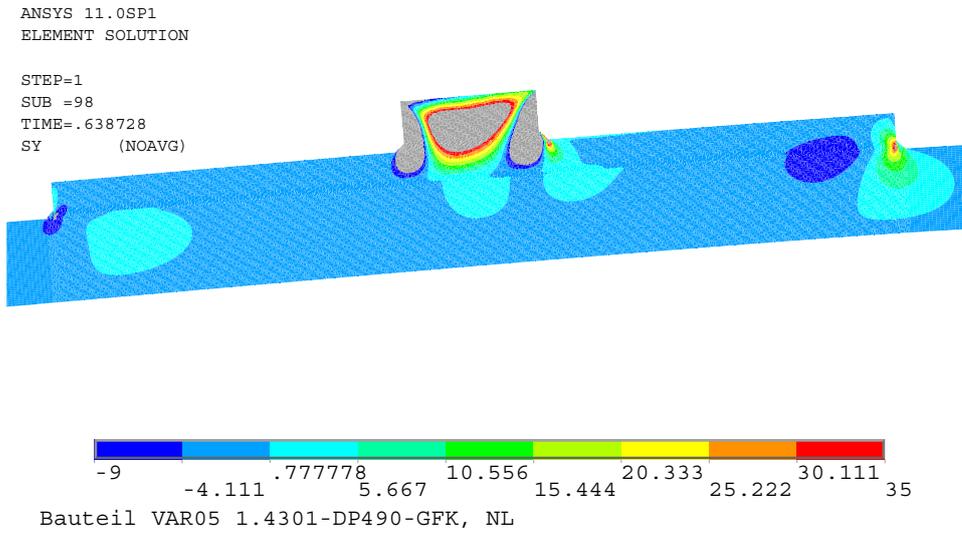


**Abb. 5.22:**  $\sigma_y$  (-20 bis 40) für VAR04 - Klebschichtdicke 0,28 mm

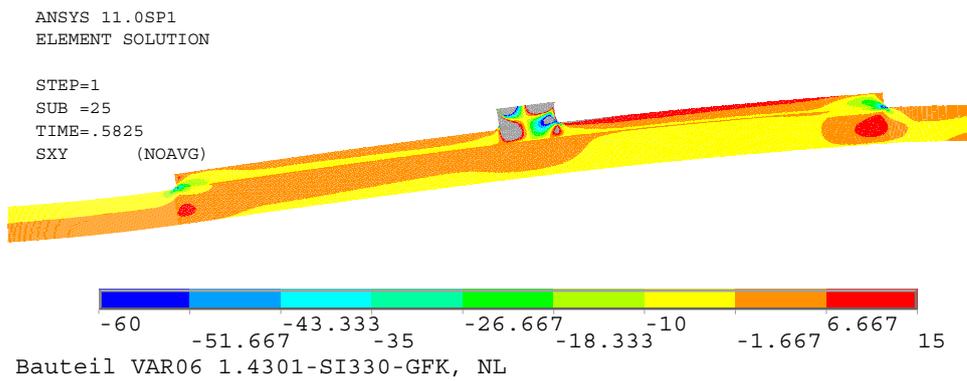


**Abb. 5.23:**  $\tau_{xy}$  (-22 bis 10) für VAR05 - Blechlänge 50 mm

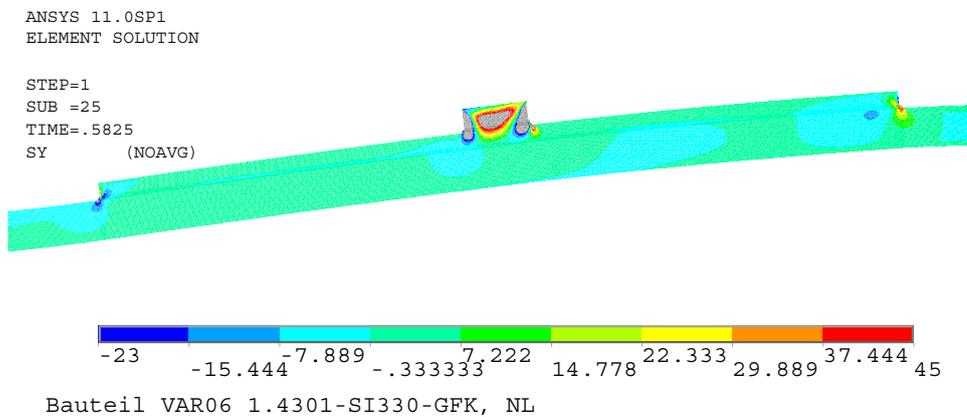
## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen



**Abb. 5.24:**  $\sigma_y$  (-9 bis 35) für VAR05 - Blechlänge 50 mm

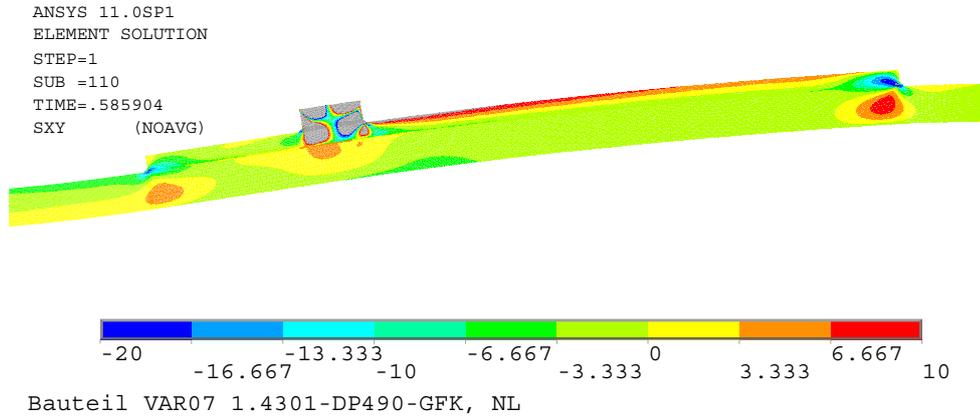


**Abb. 5.25:**  $\tau_{xy}$  (-60 bis 15) für VAR06 - Klebstoff SI330

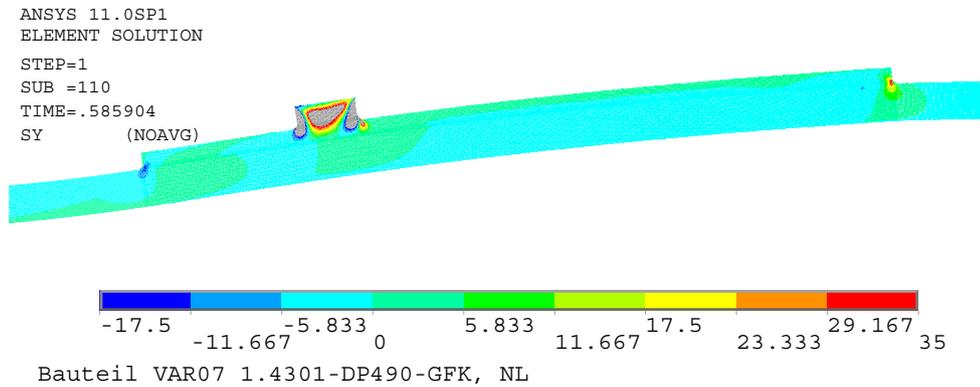


**Abb. 5.26:**  $\sigma_y$  (-23 bis 45) für VAR06 - Klebstoff SI330

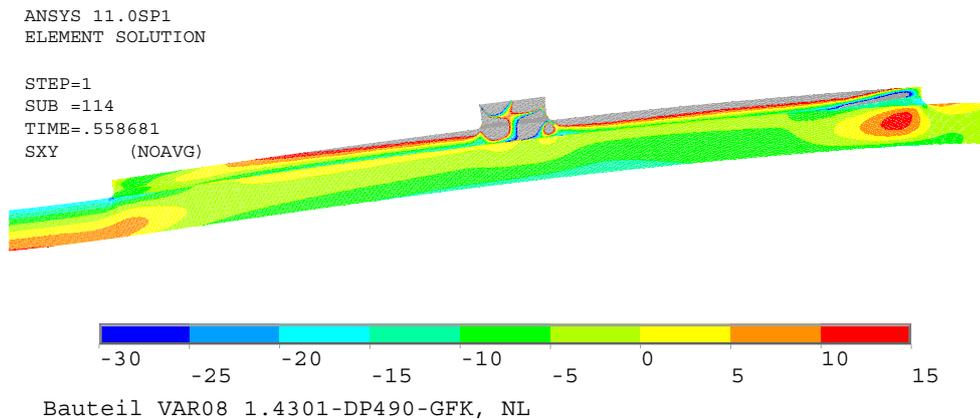
### 5.3 FE-Modell eines realitätsnahen Kraftanschlusspunktes



**Abb. 5.27:**  $\tau_{xy}$  (-20 bis 10) für VAR07 - Lastangriff vorn

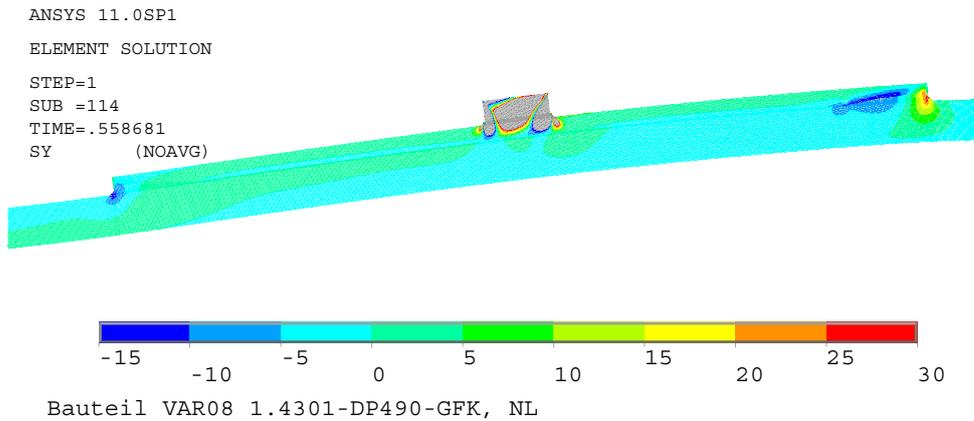


**Abb. 5.28:**  $\sigma_y$  (-17,5 bis 35) für VAR07 - Lastangriff vorn

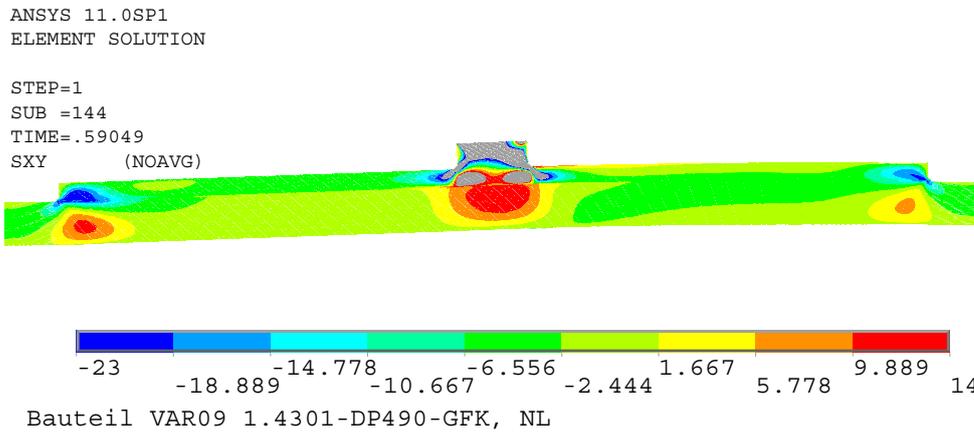


**Abb. 5.29:**  $\tau_{xy}$  (-30 bis 15) für VAR08 - gevoutet

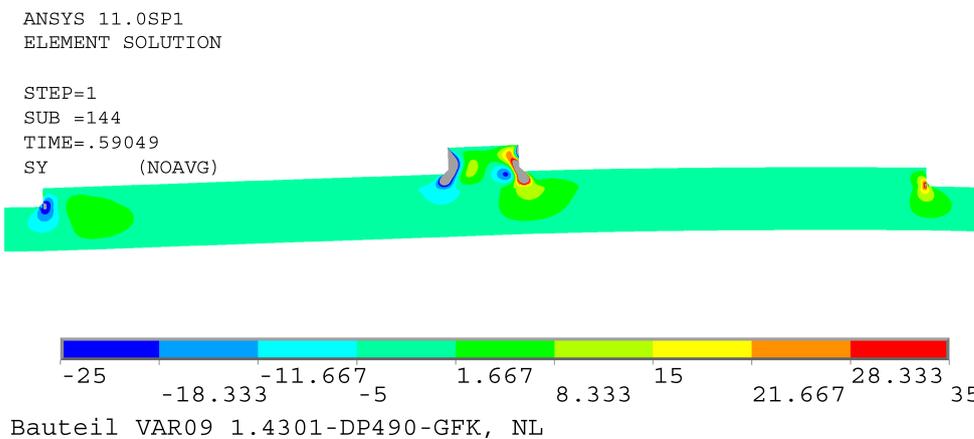
## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen



**Abb. 5.30:**  $\sigma_y$  (-15 bis 30) für VAR08 - gevoutet



**Abb. 5.31:**  $\tau_{xy}$  (-23 bis 14) für VAR09 - kurze freie Laminatlänge



**Abb. 5.32:**  $\sigma_y$  (-25 bis 35) für VAR09 - kurze freie Laminatlänge

#### 5.3.4 Bewertung Variantenuntersuchung

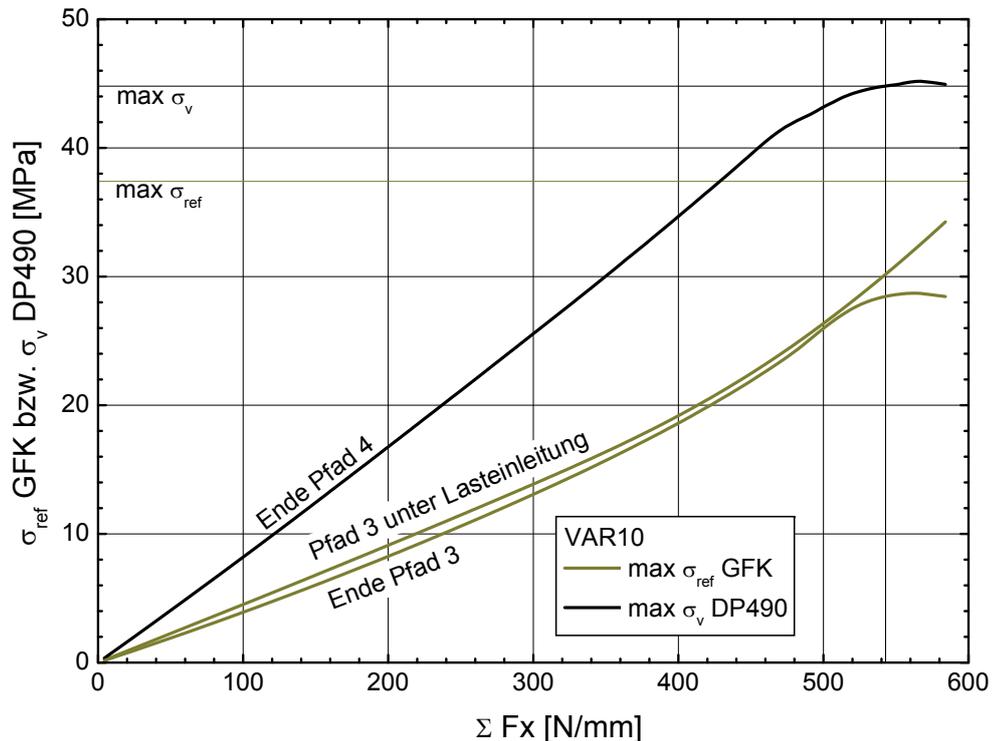
Folgende Feststellungen lassen sich aus der Variantenstudie für die untersuchte Klebeverbindung ableiten:

- Die Kraftübertragung aus dem Blech in das GFK erfolgt konzentriert an den Enden.
- Daraus folgt, dass bei gleicher Rechteck-Klebläche die größte Tragfähigkeit mit Blechen zu erreichen ist, die mit kurzer Seitenkante in Krafrichtung orientiert sind.
- Über eine Erhöhung des Biegesteifigkeitsverhältnisses von GFK zu Stahl lässt sich die Leistungsfähigkeit maßgeblich steigern.
- Eine lokale hohe Biegesteifigkeit der umgebenden GFK-Schalenstruktur wirkt verformungsreduzierend und erhöht die Bruchkraft.
- Dem Verformungsbedarf des Klebstoffes am Überlappungsende kommt ein innenliegend gevoutetes Blech spannungsreduzierend entgegen.
- Die Konzentration der Spannungen an lokalen Punkten in der einschnittig überlappten Klebefuge erfordert die Verwendung plastischer Klebstoffe, die in der Berechnung mit nichtlinearem Materialansatz abzubilden sind.
- Eine Verschiebung des Lastangriffpunktes am Blech in Krafrichtung innerhalb des gering beanspruchten inneren Klebbereiches führt zu einer Reduzierung der Schälspannungen am abhebenden Blechende.
- Eine geringe Erhöhung der Klebstoffschichtdicke verändert die rechnerischen Spannungsverhältnisse in der Verbindung nicht.

#### 5.3.5 Entwicklung Kombinationsmodell

Die Variation der Einzelparameter zeigt mehrere Möglichkeiten auf, eine Traglasterhöhung für die Verbindung zu erreichen. Die gezielte Kombination der diskreten Varianten lässt eine weitere Leistungssteigerung erwarten. Sehr deutliche Einflüsse zeigen alle Maßnahmen, die die Biegesteifigkeit des Laminates erhöhen und die Verformung senkrecht zur Krafrichtung reduzieren. Die Variante neun wird in der Kombination nicht mit berücksichtigt, weil die Verkürzung der freien Laminatlänge die Steifigkeitsverhältnisse verändert, die in der umgebenden Struktur begründet liegen. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, soll von gleichen umgebenden Strukturbedingungen ausgegangen und nur die Laminatdicke zur Veränderung der Biegesteifigkeit herangezogen werden.



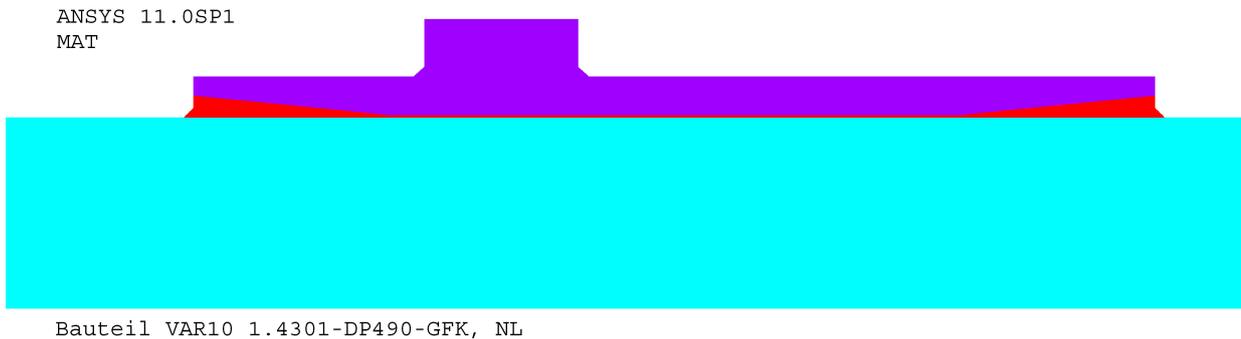


**Abb. 5.34:** Sensitivität der Auswertekriterien und Bestimmung der maximalen Reaktionskraft  $\Sigma F_x = 542,83 \text{ N/mm}$  für VAR10

Bei einer aufgeprägten Gesamtverformung von  $u_x = 1,69 \text{ mm}$  wird das Kraftmaximum von  $F_x = 542,83 \text{ N/mm}$  erreicht. Für ein Blech  $50 \times 100 \text{ mm}$  ergibt sich eine Summenkraft von  $54,28 \text{ kN}$ . Gegenüber der Ausgangsvariante VAR01 mit gleicher Blechgröße im Längseinbau und einer Maximalkraft von  $5,43 \text{ kN}$  konnte die Kraft demnach um den Faktor zehn erhöht werden.

Unter der maximalen Längskraft entsteht durch die Exzentrizität in der Verbindung ein Kräftepaar senkrecht zur Laminebene, das das aufgebrachte Moment abträgt. Die Kraft an beiden Lagerkanten beträgt  $F_y = 30,98 \text{ N/mm}$ . Im Modell entsteht unter der rechnerischen Kurzzeitbruchlast eine Verformung senkrecht zur Laminebene von  $u_y = 8,5 \text{ mm}$ . Die Lagerpressung an der Aufkantung baut sich gleichmäßig bis in Höhe der Laminatausrundung auf. Weiter oben entziehen sich die Lagerflächen durch die Biegeweichheit der Aufkantung dem Lastabtrag (Abb. 5.38). Eine lastübertragende Dichtung entlang der Bauteilkante muss demnach außen bündig (im Modell unten bündig) angeordnet werden.

## 5 Numerische Analysen an Klebeverbindungen



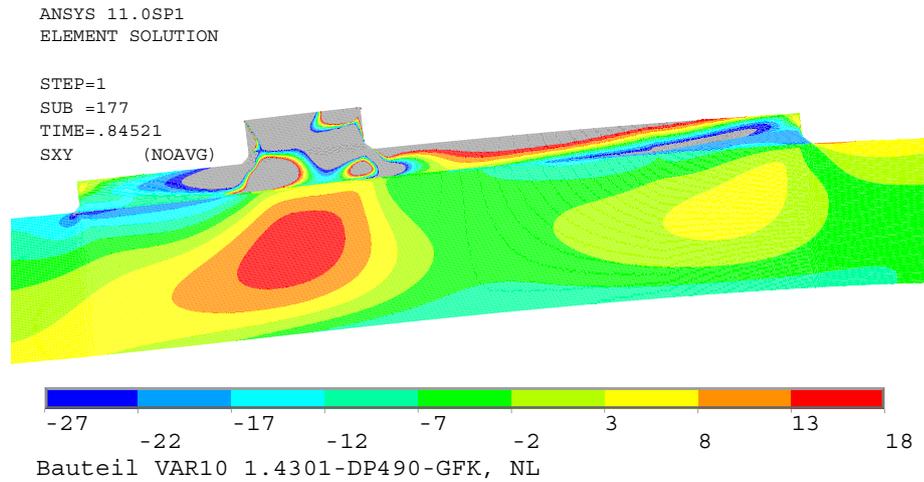
**Abb. 5.35:** Materialdefinition im Modell VAR10

Die Spannungs- und Dehnungsplots entlang der Auswertepfade (Abb. F.15 bis F.21) zeigen einen sehr ungleichmäßigen Spannungsverlauf über die Klebefugenlänge. Die aktivierte Biegebeanspruchung baut unter dem Lasteinleitungsbereich lokal Schälbeanspruchungen auf (Abb. F.24, F.25), die in ihrer Höhe den Spannungen am Blechende entsprechen (Abb. 5.34). Durch die Anordnung der Vouten konnten die Beanspruchungsspitzen am Ende der Klebung wesentlich reduziert bzw. die Belastbarkeit bei vergleichbarem Spannungsniveau erheblich gesteigert werden (Abb. 5.36, 5.37, F.26 und F.27).

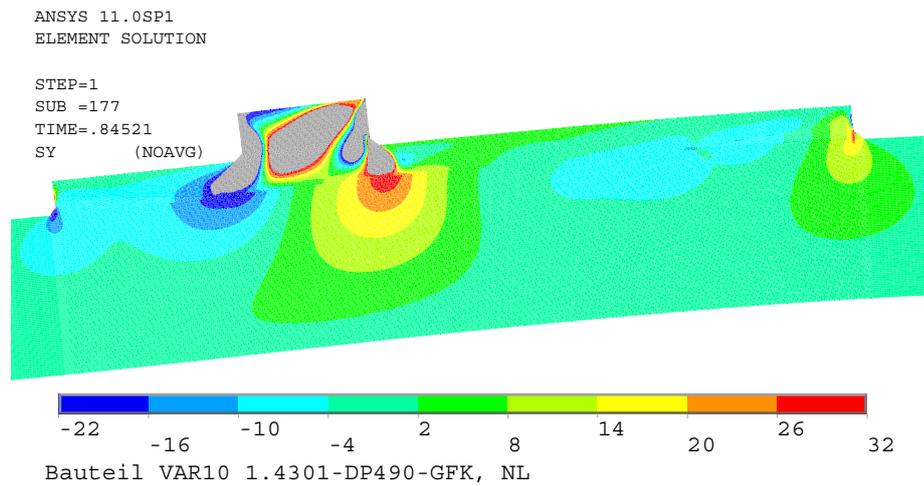
Die innere Blechkante am Voutenanfang stellt trotz des sehr flachen Voutenwinkels von  $\alpha = 5,71^\circ$  durch den Materialwechsel zum viel weicheren Klebstoff eine Singularität dar. Vor allem an der höher beanspruchten rechten Voute ergeben sich in den Elementlösungen Sprünge in den Ergebnisgrößen. Die erforderlichen Elementformen im spitzen Winkel der Voute verstärken diesen Effekt zusätzlich.

In der praktischen Umsetzung wird beim Anschleifen einer Voute keine scharfe Kante entstehen und das Problem besteht nur im numerischen Modell. Auf eine Netzverfeinerung für diesen Bereich wurde verzichtet, weil damit ein feineres Netz für die Gesamtstruktur erzwungen worden wäre. Mit etwa 650.000 Knoten und 215.000 Elementen ist das Modell ohnehin schon sehr umfangreich. Die iterative Berechnung dauerte 11 Stunden (64-bit Workstation,  $4 \times 2,83$  Ghz Xeon 5440 Prozessoren, 16 GB RAM). Für eine stabile Berechnung mussten die Iterationsschrittweiten sehr klein gewählt werden. In diesem Modell erwies sich eine Anfangsschrittweite von 0,5 % der aufgeprägten Gesamtverformung von  $u_x = 2$  mm und eine Maximalschrittweite von 3 % als günstig. Programmseitig wurden zeitweilig Schrittweiten verwendet, die nur Bruchteilen dieser Grenzwerte entsprechen.

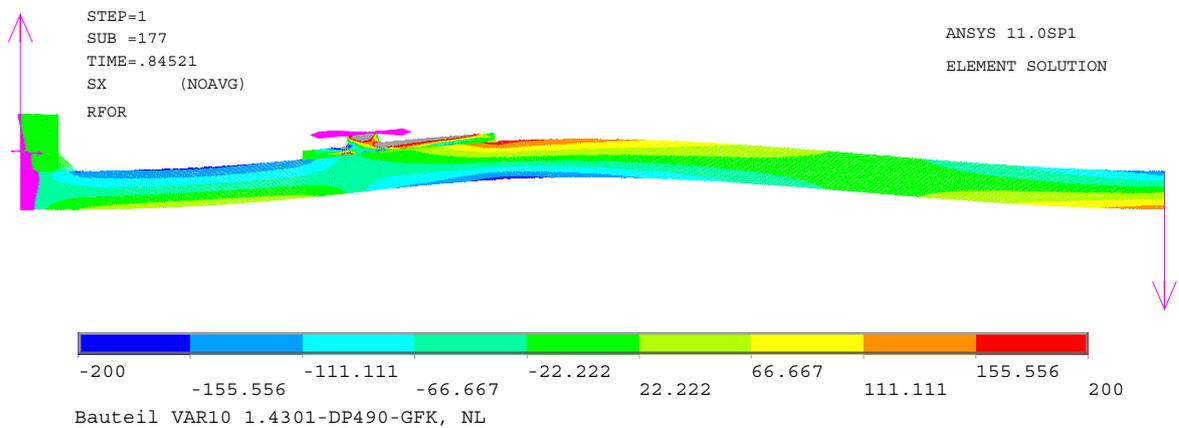
### 5.3 FE-Modell eines realitätsnahen Kraftanschlusspunktes



**Abb. 5.36:**  $\tau_{xy}$  (-27 bis 18) für die Gesamtleichtansicht des VAR10 - Kombinationsmodells



**Abb. 5.37:**  $\sigma_y$  (-22 bis 32) für die Gesamtleichtansicht des VAR10 - Kombinationsmodells



**Abb. 5.38:** 1-facher Verformungsplot mit den Spannungen  $\sigma_x$  (-200 bis 200) und einer qualitativen Darstellung der Lagerkraftvektoren des VAR10 - Kombinationsmodells

## 6 Ableitung eines ingenieurmäßigen Bemessungsvorschlags

### 6.1 Ingenieurmäßige Bemessung des Kraftanschlusspunktes

Abschließend wird eine Bemessung für die Verklebung vorgeschlagen, die für zwei Sicherheitskonzepte verglichen wird.

Die Bemessung von Kunststoffstrukturen erfolgt über die Kombination von Sicherheits- und Abminderungsfaktoren. Sicherheitsfaktoren werden entsprechend des Nachweiszieles festgelegt und werden in der BÜV-EMPFEHLUNG 2002 [92] für unterschiedliche Werkstoffe verschieden vorgeschlagen. Unsicherheiten in der Berechnung, die auf das Fehlen von werkstoffspezifischen Kennwerten unter besonderen Bedingungen zurückzuführen sind, werden in den Abminderungsfaktoren berücksichtigt und führen zur weiteren Reduzierung des für einen Nachweis anzusetzenden Festigkeitswertes. Alternativ können die Kennwerte unter dem betrachteten Einfluss im Versuch bestimmt und auf die Abminderungen verzichtet werden (z.B. Zugversuch unter max. Betriebstemperatur oder Zeitstandversuche unter Medieneinfluss).

Die Abschläge auf die Kurzzeitbruchwerte werden üblicherweise ohne Kombinationsbeiwerte überlagert. Diese Schadensakkumulationsregel gilt für Kunststoffe allgemein und wird bei Faserverbundkunststoffen und Klebstoffen äquivalent gehandhabt.

Die vorgestellten Verklebungen von Stahl und GFK müssen mit den Abschlägen für Klebverbindungen und wegen des Versagens im GFK außerdem mit den Ansätzen für den Nachweis von Faserverbundstrukturen betrachtet werden. Bei den Abminderungsfaktoren nach [92] wird für jede Einflussgröße und für jeden abzumindernden Werkstoffkennwert unterschieden (Festigkeit, E-Modul, Dehngrenze). Für den Nachweis der vorgestellten Verklebungen wird auf die Abminderungen für Festigkeitskennwerte zurückgegriffen, weil in den Berechnungen Spannungskriterien ausgewertet werden.

Die Nachweise für GFK in der BÜV-EMPFEHLUNG 2002 [92] beruhen auf dem Teilsicherheitskonzept, das Einwirkungen rechnerisch erhöht und Beanspruchbarkeiten abmindert.

$$E_d \leq R_d \leq \frac{R_{k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{mod}} \quad (6.1)$$

## 6.1 Ingenieurmäßige Bemessung des Kraftanschlusspunktes

Der Teilsicherheitsbeiwert für den Grenzzustand der Tragfähigkeit für manuell gefertigte Faserverbundkunststoffe wird in [92] mit  $\gamma_M = 1,5$  benannt. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit reduziert sich  $\gamma_M$  auf 1,0 bzw. 1,1.

Der 5%-Quantilwert des Widerstandes  $R_{k0,05}$  bestimmt sich aus dem geschätzten Mittelwert des Widerstandes  $\bar{x}_R$  und dem skalierten Schätzwert der Standardabweichung  $s_R$  in Abhängigkeit des Versuchsprobenumfanges  $n$ .

$$R_{k0,05} = \bar{x}_R - k_s \cdot s_R \quad k_s = 2,46 \text{ bei } n = 5 \quad (6.2)$$

Der Modifikationsfaktor  $A_{mod}$  setzt sich aus den einzelnen Abminderungsfaktoren zusammen.

$$A_{mod} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (6.3)$$

Die Einflussfaktoren  $A_1, A_2, A_3$  für Festigkeitswerte nach [92] decken die in der Kurzzeitfestigkeitsprüfung nicht berücksichtigten Einsatzbedingungen ab. Für den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Anwendungsfall der Klebeverbindung ergeben sich die Einflussfaktoren zu:

- $A_1 = 1,42$  → Einwirkungsdauer - Dauerlast bis zu 20 Jahre für Mischlamine bei Glasmasseanteil  $\psi = 0,58$
- $A_2 = 1,2$  → Medieneinfluss - sehr geringer Einfluss, natürliche Witterung, über 30°C, ungetempertes Material
- $A_3 = 1,22$  → Betriebstemperatur > 40°C - 60°C, Glasmasseanteil  $\psi = 0,58$

$$A_{mod} = 1,42 \cdot 1,2 \cdot 1,22 = 2,08 \approx 2,1 \quad (6.4)$$

Für die Bestimmung der 5%-Quantile der berechneten Kurzzeitfestigkeiten der bauteilähnlichen Geometrie werden die prozentualen Abschläge vom Bruchkraftmittelwert aus den einschnittigen Zugscherversuchen mit gleichem Klebstoff übertragen. Die Berechnung der 5%-Quantile aus den Versuchsproben erfolgt unter Verwendung der verzerrungsfreien Standardabweichung (Kap. 4.1). Die im folgenden genannten Mittelwerte und Standardabweichungen sind Schätzwerte der Stichproben mit einem Probenumfang von  $n = 5$ .

Die Bruchkräfte der Versuchsserie DP490.12EB erreichen den Mittelwert  $\bar{x}_R = 5\,086$  N, die verzerrungsfreie Standardabweichung  $s_R = 170$  N und den 5%-Quantilwert  $F_{k0,05} = 5\,086 - 2,46 \cdot 170 = 4\,668$  N.  $F_{k0,05}$  entspricht damit 91,8% von  $\bar{x}_R$ .

Die Bruchkräfte der Versuchsserie DP490.24EB erreichen den Mittelwert  $\bar{x}_R = 6\,866$  N, die verzerrungsfreie Standardabweichung  $s_R = 617$  N und den 5%-Quantilwert  $F_{k0,05} = 6\,866 - 2,46 \cdot 617 = 5\,348$  N.  $F_{k0,05}$  entspricht damit 77,9% von  $\bar{x}_R$ .

## 6 Ableitung eines ingenieurmäßigen Bemessungsvorschlags

Die Bruchkräfte der Versuchsserie DP490.24EBS erreichen den Mittelwert  $\bar{x}_R = 6\,796\text{ N}$ , die verzerrungsfreie Standardabweichung  $s_R = 415\text{ N}$  und den 5%-Quantilwert  $F_{k0,05} = 6\,796 - 2,46 \cdot 415 = 5\,775\text{ N}$ .  $F_{k0,05}$  entspricht damit 85,0 % von  $\bar{x}_R$ .

Der Mittelwert des prozentualen Anteils von  $F_{k0,05}$  an  $\bar{x}_R$  aus allen drei Versuchsreihen mit dem Klebstoff DP490 ergibt 84,9%. Überträgt man dieses Ergebnis auf die rechnerischen Bruchwerte der Kombinationsvariante VAR10 aus Kap. 5.3.6 erhält man für das Rechenmodell einen 5%-Quantilwert auf die Bruchlast von  $F_{k0,05} = 0,849 \cdot 54\,280\text{ N} = 46\,084\text{ N}$ .

Die Bemessungskraft  $F_d$  im GZT ergibt sich nach (6.1) für VAR10 zu:

$$F_d \leq \frac{F_{k0,05}}{\gamma_M \cdot A_{mod}} = \frac{46\,084\text{ N}}{1,5 \cdot 2,1} = 14\,630\text{ N} \quad (6.5)$$

Das entspricht einer Gesamtabminderung des 5%-Quantilwertes der Verbindungskraft von  $F_{k0,05}$  auf 31,7 % bzw. ein Abschlag vom Mittelwert der rechnerischen Bruchkraft auf 27,0 %. Hinzu kommen die Teilsicherheiten auf der Lastseite.

In anderen Quellen wird der Festigkeitsnachweis global mit zulässigen Spannungen geführt [14, 69, 18]. Unterschiedlich wird die Trennung in Sicherheits- und Abminderungsfaktoren gehandhabt. Teilweise werden alle abmindernden Umstände in Abminderungsfaktoren gepresst und das Prinzip eines Festigkeitsnachweises verletzt. Die Trennung in werkstoff-spezifische Abminderungs- und den auf das Nachweisziel ausgerichteten Sicherheitsfaktoren wird bei ERHARD [69] vorgenommen. Er schlägt den Sicherheitsfaktor gegen Bruch von  $S \geq 2,0$  vor. Beim Nachweis gegen den 5%-Quantilwert der Nachweisgröße sind Vereinfachungen aus Kennwertermittlung, Geometrie, Verarbeitungseinflüssen und Unsicherheiten bei der Lastannahme abgedeckt. Die zulässige Einwirkungsgröße ist definiert mit:

$$E_{zul} \leq R_{zul} \leq \frac{R_{0,05}}{S} \cdot \frac{1}{A_{ges}} \quad (6.6)$$

$$A_{ges} = \frac{1}{A_T} \cdot \frac{1}{A_{st}} \cdot \frac{1}{A_{dyn}} \cdot \frac{1}{A_A} \dots \quad (6.7)$$

Die Abminderungsfaktoren entsprechen den im Festigkeitswert  $R_{0,05}$  unberücksichtigten Einflüssen:

- $A_T$  - erhöhte Betriebstemperatur,
- $A_{st}$  - Zeitdauer statischer Last,
- $A_{dyn}$  - dynamische Lasten und
- $A_A$  - Alterung, Medieneinwirkung.

## 6.1 Ingenieurmäßige Bemessung des Kraftanschlusspunktes

Den Klebstoff DP490 hat PETERS am ITKE in Stuttgart untersucht [18] und an Klebstoffschulterstäben u.a. die Kriechneigung abgeschätzt. Er empfiehlt für die geringe Kriechneigung des Klebstoffes eine Abminderung für Dauerbelastung von  $\frac{1}{A_{st}} = 0,8$  ( $A_{st} = 1,25$ ). Am untersuchten Schulterstab unter Zug liegen im Tragquerschnitt gleichmäßig hohe Beanspruchungen vor. In einer überlappten Verklebung werden dagegen nur lokal hohe Beanspruchungen erzeugt. Das plastische Verformungsvermögen des Klebstoffs führt bei Langzeitbelastung und bei höheren Betriebstemperaturen zu einem Abbau der Spannungen in diesen Bereichen. Die gering beanspruchten Zonen innerhalb der Verklebung bilden dabei den von HART-SMITH in [48] beschriebenen Kriechschutz der Verbindung (Kap. 2.9.4). Die Abminderung für das Kriechen unter Dauerlast in einer Zugscherverbindung könnte demnach geringer bzw. der Faktor größer gewählt werden. Zeitstandversuche wurden in dieser Arbeit nicht durchgeführt, sodass ein absolut günstigerer Wert nicht fundiert benannt werden kann.

Die künstliche Alterung ohne mechanische Belastung am gleichen Klebstoff führte in [18] zur größten Einzelabminderung. Ein Vergleich zur realen freien Bewitterung über zwei Jahre zeigt, dass der synthetische Alterungstest eine sehr harte Prüfung darstellt. Während der Faktor für die acht Wochen Laboralterung mit  $\frac{1}{A_A} = 0,65$  ( $A_A = 1,54$ ) bestimmt wurde, lag er für zwei Jahre Freibewitterung bei  $\frac{1}{A_A} = 0,98$  ( $A_A = 1,02$ ). In der künstlichen Alterung versagten durchweg die GFK-Pultrusionsprofile, sodass der Festigkeitsabfall nicht direkt dem Klebstoff zuzuschreiben ist. Die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verbindungslösungen befinden sich auf der wettergeschützten Innenseite von GFK-Strukturen. Eine direkte Beaufschlagung mit UV-Licht erfolgt nicht. Außerdem sind die Füge­teile nicht durchlässig für UV-Licht, sodass der Klebstoff durch UV-Licht nicht beeinträchtigt wird. Feuchtigkeit an der Verklebung ist über Kondenswasser und Luftfeuchte denkbar. Eine Beaufschlagung mit Regen ist nicht zu berücksichtigen. Die Alterung muss nicht so streng bewertet werden und wird auf  $\frac{1}{A_A} = 0,80$  ( $A_A = 1,25$ ) geschätzt.

Der Abminderungsfaktor für Temperatur wird in [18] aus Zugprüfungen am DP490 bei  $+80^\circ\text{C}$  mit  $\frac{1}{A_T} = 0,72$  ( $A_T = 1,39$ ) angegeben.

Die Literatur gibt allgemeine  $A$ -Faktoren nach dem globalen Sicherheitskonzept an:

- $A_{st}$  - 1,25 ... 2,5 bei 1000 h [93], 1,67 für Langzeitbeanspruchung von Kunststoffklebungen [14], 1,7 bei Belastungsdauer von Monaten und 2,0 bei Belastungsdauer von Jahren [69], 2,0 EP bis  $60^\circ\text{C}$  bzw. 1,43 ... 2,0 allg. [94], 2,0 [32]
- $A_{dyn}$  - 5,0 Langzeitbeanspruchung zyklisch für  $n = 10^7$  [14], zyklische Beanspruchung 5,0 ... 10,0 [14], 1,3 ... 1,6 [69], 5,0 ... 6,7 für  $n > 10^6$  [94], 3,3 [32], 5,0 für Ermüdungsfestigkeit GFK [90]

## 6 Ableitung eines ingenieurmäßigen Bemessungsvorschlags

- $A_T$  - 2,0 bei duroplastischen Klebschichten im Temperaturbereich 80 - 100°C [14]
- $A_A$  - ca. 3,3...5,0 für Feuchtigkeitseinfluss bei Ausschluss von bondline corrosion [14]

Für die in Kap. 5.3.5 berechnete bauteilähnliche Klebeverbindung VAR10 werden nach dem globalen Sicherheitskonzept die Abminderungsfaktoren festgelegt:

- $A_T$  - 1,4 nach [18]
- $A_{st}$  - 1,25 nach [18]
- $A_{dyn}$  - 1,0 keine wesentlichen zyklischen Lastanteile
- $A_A$  - 1,25 Mittelwert aus natürlicher und künstlicher Alterung nach [18]

Die zulässige Belastbarkeit  $F_{zul}$  der Klebeverbindung lässt sich damit angeben zu

$$F_{zul} \leq \frac{F_{0,05}}{S} \cdot \frac{1}{A_{ges}} = \frac{46\,084\,N}{2,0} \cdot \frac{1}{1,4} \cdot \frac{1}{1,25} \cdot \frac{1}{1,0} \cdot \frac{1}{1,25} = 10\,533\,N \quad (6.8)$$

Die zulässige Belastbarkeit entspricht einer Gesamtabminderung von  $R_{0,05}$  auf 22,9% bzw. einen Abschlag vom Mittelwert der rechnerischen Bruchkraft auf 20,6%. Die Lasten werden ohne zusätzliche Sicherheiten in Ansatz gebracht. Die Ergebnisse nach (6.5) und (6.8) unterscheiden sich um den Faktor  $\frac{F_d}{F_{zul}} = \frac{14\,630}{10\,533} = 1,39$ . Dieser Unterschied entspricht einem mittleren Teilsicherheitsbeiwert für eine gemischte Belastung aus Eigengewicht und Verkehrslast, sodass die Ergebnisse als nahezu identisch angesehen werden können.

Für die Geometrie VAR10 entspricht der Bemessungswert der Verbindungskraft nach dem Teilsicherheitskonzept einer Kraft von  $0,27 \cdot 542,83 = 146,3\,N/mm$ . Die Reduzierung der rechnerischen Spannungsgrößen für diese Kraft kann in Abb.5.34 und Tab.6.1 nachvollzogen werden. Die für die Auswertung maßgebende Vergleichsspannung im Klebstoff ändert sich nahezu linear mit der reduzierten Verbindungskraft, während sich die Beanspruchung im GFK unter der Bemessungskraft stärker reduziert.

Zustand	Kraft	Kraft	DP490	DP490	GFK	GFK
	F	F	$\sigma_v$	$\sigma_v$	$\sigma_{ref}$	$\sigma_{ref}$
	N/mm	%	MPa	%	MPa	%
Bruch	542	100	44,8	100	30,2	100
Bemessung GZT	146,3	27,0	12,1	27,0	6,6	21,9

**Tabelle 6.1:** Vergleich mittlerer rechnerischer Bruch- und Bemessungsgrößen nach dem Teilsicherheitskonzept für die bauteilähnliche Geometrie VAR10

## 6.2 Übersicht zum Bemessungsablauf

Mit dem dargelegten Vorgehen zur Auslegung einer Klebeverbindung zwischen aufgesetzten Lasteinleitungsblechen und flächigen GFK-Laminatstrukturen lassen sich unterschiedliche Anwendungsfälle erfassen und bemessen. Der Gesamtablauf einschließlich der Bemessung der Verklebung ist in Abb. 6.1 zusammengefasst.

Die vorgeschlagene Bemessung von Klebeaufgaben zwischen GFK-Laminaten und Stahlblechen basiert auf einfachen Versuchen, die die individuellen Lamineigenschaften und die Güte der Oberflächenbehandlung und somit den adhäsiven Verbund zwischen dem Klebstoff und den Fügepartnern mit berücksichtigt. Erst bei wiederholten Klebeaufgaben mit gleichen Randbedingungen in Bezug auf die Oberflächenbehandlung, die Produktionsqualität und das Material der Fügepartner und des Klebstoffs kann auf Versuche verzichtet werden. Die Auslegung beginnt in diesem Fall mit dem konstruktiven Entwurf der Klebegeometrie (Abb. 6.1).

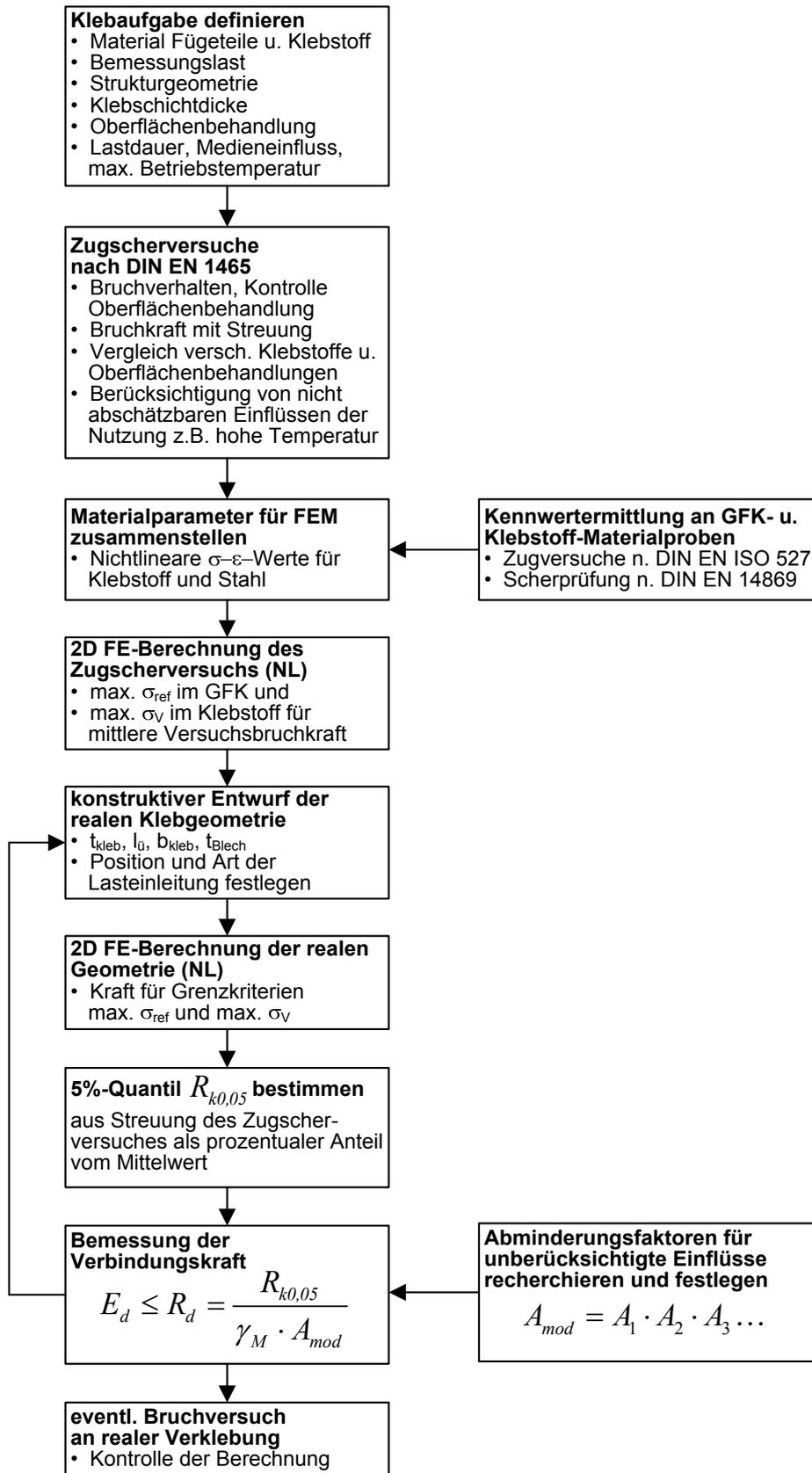
Über die Nachrechnung von Zugscherversuchen mit einem geometrisch und physikalisch nichtlinearem finiten Elementemodell lässt sich für das Laminat und den Klebstoff eine maximale Beanspruchung in Form einer örtlichen Vergleichsspannung bzw. Referenzspannung für eine aus Versuchen bekannte mittlere Bruchkraft berechnen. Die nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für die Materialmodelle stammen aus einfachen Zugversuchen an Substanzproben und werden als Wertepaartabelle eingelesen.

Aufgrund des unterschiedlichen mechanischen Verhaltens der dünnen Klebschicht zur zwangungsfreien Klebstoffsubstanz werden die Grenzkriterien nicht mit Bruchspannungen aus Zugversuchen an Schulterstäben vergleichbar sein.

Die Grenzkriterien werden in einem nichtlinearem 2D-FE-Modell der realen Klebegeometrie als Abbruchbedingung der iterativen verformungsgesteuerten Berechnung verwendet. Für den betreffenden Lastschritt wird die Summe der Lagerreaktionskräfte als maximal ertragbare Kraft ausgelesen.

Die Basis der Kriterien sind Versuchsmittelwerte, sodass die berechnete Kraft ebenfalls als ein Mittelwert zu interpretieren ist und mit dem gleichen prozentualen Abschlag versehen wird, wie es die Ermittlung des bemessungsrelevanten 5%-Quantils aus der Zugscherversuchsserie ergibt. Es findet dadurch eine Übertragung der Versuchsstreuung in die Auslegung der realen Bauteilgeometrie statt.

## 6 Ableitung eines ingenieurmäßigen Bemessungsvorschlags



**Abb. 6.1:** Ablauf der Bemessung einer strukturellen GFK-Stahl-Klebeverbindung

Schlussendlich kann über  $A_{mod}$ -Faktoren eine Einbeziehung von bisher unberücksichtigten, die Tragfähigkeit reduzierenden, Einflüssen vorgenommen werden. Über die Material-sicherheit  $\gamma_M$  erhält man für die Verbindungskraft eine Bemessungsgröße nach dem Teilsicherheitskonzept, die den Designeinwirkungsgrößen gegenübergestellt werden kann.

Mit der vorgestellten Verbindungslösung für schalenartige GFK-Hüllkonstruktionen lassen sich ausreichend hohe Kräfte übertragen. Die Tragfähigkeit der Verklebung hängt neben den Materialeigenschaften und Oberflächenvorbehandlungen auch wesentlich von Geometriedetails wie Klebbebreite, Steifigkeitsverhältnis lokal um die Klebestelle in der GFK-Struktur, Ausbildung der Randbereiche der Füge-teile und der Klebfuge (Vouten, Klebstoffrandkeil) und vom Krafteintrag in das Lastblech ab (Lasteinleitungsposition, Exzentrizität).

In der manuellen handwerklichen Verarbeitung können mit einfach handhabbaren Klebstoffen und Oberflächenvorbehandlungen Verbindungen produziert werden, bei denen eine Begrenzung der Tragfähigkeit in der interlamina-ren Tragfähigkeit der GFK-Struktur gegeben ist und nicht im Klebstoff oder seinen Kontaktflächen selbst.

In der Variantenstudie wurde gezeigt, dass mit wenigen Eingriffen an der Geometrie der Verklebung die Tragfähigkeit um ein Vielfaches gesteigert werden kann.

Die realen Verbindungsbleche werden über mehr als eine Reihe Anschlussleisten oder -bolzen verfügen. Dieser Umstand wird die Spannungsverteilung in der Klebfuge zusätzlich beeinflussen. Eine projektbezogene Auslegung von Klebeverbindungen ist durch die Vielzahl der Einflussgrößen unumgänglich.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Für tragende Konstruktionen aus Kunststoffen im Bauwesen kommt vorrangig glasfaserverstärktes ungesättigtes Polyesterharz in Betracht. Dieser Verbundwerkstoff bietet ein ausgewogenes Verhältnis aus Festigkeitseigenschaften und Materialkosten.

Die duroplastischen faserverstärkten Kunststoffe eignen sich wegen freier Formbarkeit, Dichtigkeit, hoher Festigkeit, Transluzenz, Medienbeständigkeit und geringer Wärmeleitfähigkeit als Leichtbaumaterial für flächige tragende und insbesondere einfach und doppelt gekrümmte raumbildende Strukturen.

Ein Hauptproblem der Anwendung ist die materialgerechte Verbindungstechnik für die einzelnen FVK-Strukturteile, die als Fertigteile im Bauprozess verzögerungsfrei montiert werden. Besonders wünschenswert sind Verbindungslösungen, die den speziellen Werkstoffeigenschaften der anisotropen verklebten Fasertragstruktur gerecht werden.

In der vorliegenden Arbeit wird dafür eine Kombination aus Verklebung und mechanischer Fügung vorgeschlagen. Lokal begrenzte Stahlteile werden unter günstigen Werkstattbedingungen fasergerecht mit den FVK-Teilen verklebt, um unter Baustellenbedingungen für eine verzögerungsfreie und witterungsunabhängige mechanische und lösbare Verbindung zur Verfügung zu stehen. Die Verbindung besteht aus den drei Komponenten Verklebung des Bleches, mechanisches Verbindungsmittel zwischen gegenüberliegenden Blechen und Fuge zwischen den Bauteilen mit einem kraftschlüssigen Kontakt. Der Fokus der Arbeit wird auf die Bemessung der Klebeverbindung gelegt.

Die Auslegung der Verklebung erfolgt über eine Kombination aus einfachen Versuchen und einem geometrisch und physikalisch nichtlinearen Modell finiter Elemente sowie einer anschließenden ingenieurmäßigen Bemessung. In Zugscherversuchsserien werden geeignete Kombinationen aus Klebstoffen, Stahl und GFK sowie verschiedenen Oberflächenbehandlungen ermittelt. Über die Bewertung der Bruchbilder werden Erkenntnisse zur Qualität des Adhäsionsverbundes der Klebstoff-Fügeteilpaarungen in Kombination mit den verwendeten Oberflächenbehandlungen erlangt. Unter

Berücksichtigung der Randbedingungen einer handwerklichen Unikat- bzw. Kleinserienfertigung wird eine geeignete Klebtechnologie ausgewählt, Klebstoffprodukte verglichen und Anforderungen an günstige Klebstoffeigenschaften formuliert.

Die nichtlinearen Materialkennwerte werden in Zugversuchen an Substanzproben ermittelt und finden direkt Eingang in die Modellierung der Materialeigenschaften. Beanspruchungsgrenzen der Materialien werden aus Nachrechnungen der Zugscherversuche abgeleitet. Die Grenzkriterien werden in einem nichtlinearem zweidimensionalen Modell finiter Elemente der realen Klebegeometrie als Abbruchbedingung der iterativen verformungsgesteuerten Berechnung verwendet. Die Ableitung einer Kraftbemessungsgröße für die Klebeverbindung im Nachweiskonzept der Teilsicherheitsbeiwerte wird dargelegt.

Unter Verwendung leistungsfähiger Strukturklebstoffe kann ein Versagen der Klebschicht und vor allem der Adhäsionsbereiche vermieden werden. Die Verbindungen versagen durch Delamination der Faserverbundstruktur. Ein Schutz der Klebkonstruktion vor mechanischer Überlastung ist über eine Begrenzung der Tragfähigkeit der auf das Blech aufgesetzten und leicht austauschbaren Verbindungsmittel möglich.

In einer Variantenuntersuchung konnte gezeigt werden, dass mit der bewussten Wahl von Geometrieparametern die Tragfähigkeit einer Verklebung signifikant gesteigert werden kann.

Mit Hilfe der in der Arbeit zusammengestellten Ausführungsempfehlungen können leistungsfähige Klebeverbindungen konstruktiv geplant und mit den erarbeiteten ingenieurmäßigen Bemessungsansätzen dimensioniert werden. Das Potenzial der vorgestellten Verbindungstechnologie und des Bemessungsansatzes wird in einer Parameterstudie nachgewiesen und mit zwei gebauten Beispielen verifiziert.

Die Faserverbundkunststoffe belegen in vielen Bereichen der Technik, des Fahrzeug- und Maschinenbaus ihr hohes Leistungspotenzial. In gezielter Kombination der materialtypischen Vorteile mit einer fasergerechten Formgebung und Verbindungstechnik wird das Material in konstruktivem Einsatz auch für das Bauwesen eine Bereicherung sein.

## 7.2 Ausblick

Die in Berechnungen verwendeten Materialmodelle beinhalten viele Annahmen und Vereinfachungen. Während die Rechentechnik stetig weiterentwickelt wird, ändern sich die Datengrundlagen für die Abbildung der Materialien wenig. Ein Grund für diesen Zustand sind sicher die erheblichen versuchstechnischen Aufwendungen zur Verbreiterung der Datenbasis. Gerade im Bereich der Kunststoffe und der Klebstoffe im Speziellen ist die große Vielfalt an Werkstoffvarianten der Grund für oft unzureichende Informationen zu mechanischen Kennwerten. In dieser Arbeit werden ausschließlich Versuche unter Kurzzeitbelastung bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Auswirkung der Einflüsse Dauerlast und Medieneinwirkung werden in der Bemessung aus den Erfahrungen anderer Autoren abgeschätzt. Die Kombination beider Einflüsse ist von hohem Aussagewert für die Bemessung und ebenso aufwändig in der versuchstechnischen Umsetzung. Für eine höhere Aussagesicherheit in der Bemessung müssen solche Versuche Gegenstand weiterführender Arbeiten sein. Diese Versuche sind als Langzeitprüfungen unter natürlicher Bewitterung oder verkürzt in künstlichem Klimawechseltests durchzuführen. Erweitern kann man den Forde- rungskatalog noch um das Verhalten bei höheren Betriebstemperaturen und unter zyklischen Belastungen. Nach der Vorauswahl günstiger Klebstoffprodukte in einfachen Kurzzeittests muss die Aufmerksamkeit den tiefer gehenden Fragen an die Werkstoffe gewidmet werden.

Ein zusätzlicher Fokus kann zukünftig auf eine Kombination der Verbindungstechnologie mit Sandwichstrukturen gelegt werden, deren dünne Deckschichten besonders sensitiv auf lokale Lasteinleitungen reagieren. Weiterhin ist der Ersatz der Edelstahlbleche durch beschichtete unvergütete Bleche und deren Einfluss auf hochfeste Verklebungen von Interesse.

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 527: *Teil 1 - Kunststoffe, Bestimmung der Zugeigenschaften, Allgemeine Grundsätze*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1996.
- [2] DIN EN 1465: *Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit hochfester Überlappungsklebung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994.
- [3] 3M: *Scotch-Weld DP 490 - Produkt-Information*. 3M Deutschland GmbH, Februar 2003.
- [4] UHU PLUS MULTIFEST: *Technisches Merkblatt*. UHU GmbH u. Co. KG, Bühl.
- [5] SIKABOND-T14: *Klebstoffdatenblatt*. Sika Deutschland GmbH, April 2006.
- [6] SIKADUR-30: *Technisches Merkblatt*. Sika Deutschland GmbH, Oktober 2005.
- [7] SIKADUR-31CF NORMAL: *Technisches Merkblatt*. Sika Deutschland GmbH, Juli 2007.
- [8] SIKADUR-330: *Technisches Merkblatt*. Sika Deutschland GmbH, Oktober 2006.
- [9] TUNKEL, C.: *Bauen mit neuen Werkstoffen*. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Oktober 1999.
- [10] KNAUER, B.; WENDE, A.: *Konstruktionstechnik und Leichtbau*. Akademie-Verlag, Berlin, 1988.
- [11] MICHAELI, W.; WEGENER, M.; U.A.: *Einführung in die Technologie der Faserverbundkunststoffe*. Carl Hanser Verlag, München, 1989.
- [12] KNIPPERS, J.; GABLER, M.: *Stahlbau-Kalender 2007*, Kapitel Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen, S. 455-498. Ernst und Sohn Verlag, 2007.
- [13] SCHÜRMAN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [14] HABENICHT, G.: *Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Springer Verlag, Berlin, 5. Auflage Auflage, 2006.
- [15] KURATH, J.; STURZENEGGER, C.: *Tragende Platten aus Kunststoff*. tec21, 51/52, 2006.

## Literaturverzeichnis

- [16] HINTERSDORF, G.: *Tragwerke aus Plasten*. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1972.
- [17] ACKERMANN, G.: *Der Bau von Tragwerken aus Kunststoffen im Osten Deutschlands (1945-1990)*. Bautechnik 78 (2001), S. 503-524.
- [18] PETERS, S.: *Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen*. Doktorarbeit, ITKE, Universität Stuttgart, Februar 2006.
- [19] MICHAELI, W.; HUYBRECHTS, D.; WEGNER, M.: *Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen, Einführung und praktische Hilfen*. Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [20] GENZEL, E.: *Zur Geschichte der Konstruktion und der Bemessung von Tragwerken des Hochbaus aus faserverstärkten Kunststoffen 1950 - 1980*. Doktorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2006.
- [21] SAECHTLING, H.: *Bauen mit Kunststoffen*. Carl Hanser Verlag, München, 1973.
- [22] VOIGT, P.: *Die Pionierphase des Bauens mit glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK)*. Doktorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, März 2007.
- [23] FRANKEN, H. W.: *Beurteilung der Lebensdauer von langfristig beanspruchten GF-UP-Bauteilen*, Band T 2067. Fraunhofer IRB Verlag, 1988.
- [24] KNIPPERS, J.; GABLER, M.: *New Design Concepts for Advanced Composite Bridges - The Friedberg Bridge in Germany*. In: *Proceedings of the IABSE Conference in Budapest*, 2006.
- [25] KNIPPERS, J.; GABLER, M.; PELKE, E.; BERGER, D.: *The FRP Bridge in Friedberg Germany: Design, Analysis and Material Tests*. In: *Proceedings of the IABSE Conference*, 2007.
- [26] STURZENEGGER, C.; HENCKEL, P.; KURATH J.: *Der Weg von der Forschung in die Praxis: Neuer Verbindungssteg über die Eulach zwischen Talwiesen und Scheco-Areal*. In: *Pressedokumentation ZHAW / ZHAW (Hrsg.) - Winterthur*. April 2009.
- [27] POLÓNYI, S.: *Schalen in Beton und Kunststoff*. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1970.
- [28] EHRENSTEIN, G.W.: *Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2006.
- [29] WENDE, A.; MOEBES, W.; MARTEN, H.: *Glasfaserverstärkte Plaste*. Dt. Verlag für die Grundstoffindustrie, 2. Auflage, 1968.
- [30] LANGE+RITTER FASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE: *Produktkatalog 2009/2010*. [www.lange-ritter.de](http://www.lange-ritter.de).

- [31] RUTH, J.: *Werkstoffverhalten in Grenzflächenbereichen der Tragelemente von Bauwerken*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Juli 1993.
- [32] EHRENSTEIN, G. W. (HRSG.): *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. Carl Hanser Verlag, München, 2004.
- [33] SEDLACEK, G.; FELDMANN, M.; VÖLLING, B.; TRUMPF, H.: *Geklebte Verbindungen im Stahlbau*. In: *Tagungsband zum 5. Klebkolloquium - Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*, Februar 2005.
- [34] PARK, D.-U.: *Materialgerechte lösbare Fügeverbindungen bei glasfaserverstärkten Kunststoffen, Forschungsbericht 29*. ITKE Universität Stuttgart, 2007.
- [35] KNAUER, B.: *Beitrag zum Problem der Krafteinleitung in Konstruktionselemente aus verstärkten Plasten*. Doktorarbeit, TU Dresden Fak. Maschinenwesen, Januar 1971.
- [36] BERGMANN, H.W.: *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [37] ERMANNI, P.: *Klebeverbindungen - Dimensionieren I, Vorlesungsskript*. ETHZ, Dezember 2006.
- [38] GROSSKURTH, L.; SCHLIMMER M.: *Auslegung von zähelastischen Metall/Faserverbund-sandwich-Verbindungen*. Tagungsband 6. Klebkolloquium - Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, Februar 2006.
- [39] KURATH, J. ; BARBARANI, J.: *Tragkonstruktionen aus Faserverbundkunststoffen im Bauwesen: Entwicklungen von neuen Tragwerksformen im Rahmen der Expo 02*. In: *Tagungsbeilage*, Winterthur, ZHAW (Hrsg.), 2002.
- [40] LODERER, B.: *Fiberglas: Das Material mit Eigenschaften*. Beilage zu Hochparterre, 4/04, Verlag Hochparterre und Swissfiber, 2004.
- [41] ULMER, K.: *Grenzflächenverhalten und Spannungsverteilung in Metallklebverbindungen*. Doktorarbeit, TH Hannover, 1963.
- [42] DIN EN 13887: *Leitlinien für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2003.
- [43] SCHLIMMER, M.: *Prozesssicheres Kleben von Rundsteckverbindungen aus metallischen Werkstoffen unter rauen Fertigungsbedingungen*. Schlussbericht, AIF 13455N/4, 2003-2005.

## Literaturverzeichnis

- [44] VALLÉE, T.: *Adhesivly bonded lap joints of pultruded GFRP shapes*. Doktorarbeit, Lausanne, EPFL, 2004.
- [45] KNAUER, B.; STARKE, L.; HAHNEMANN, A.; MEYER, B.; SCHAAF, W.: *Konstruktiver Plasteinsatz*. Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie, Leipzig, 2. Auflage, 1981.
- [46] MONIATIS, G.: *Beanspruchungszustand und Festigkeitsverhalten von Kunststoff-Metall-Klebverbindungen bei quasistatischer Belastung*. Doktorarbeit, TU Berlin, 1990.
- [47] SEDLACEK, G.; TRUMPF, H.: *Mobile Leichtbau-Festbrücken aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen*. Bauingenieur Jg. 78, S. 451-458, Oktober 2003.
- [48] LEE, S.M.: *International Encyclopedia of Composites*, Band 2, Kapitel von Hart-Smith, L. J.: *Joining, Mechanical Fastening*, S. 438-460. VCH Verlagsgesellschaft mbH, New York, 2. Auflage, 1990.
- [49] DIN EN ISO 10365: *Klebstoffe - Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 1995.
- [50] ADAM, H.: *Der Herzschlag von Doetinchen*. db (deutsche bauzeitung), Vol. 140 Nr. 4, S. 55-59, 2006.
- [51] KURATH, J.: *Transluzente Bauwerke in FVK*. In: *Fachtagung - Composites in Architecture*. Dessau, SKZ, Dezember 2008.
- [52] BAYER, V.; GENZEL, E.; KRAUSE, T.; LINNE, S.; VOIGT, P.: *FOMEKK - Forschungsgruppe materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren mit faserverstärkten Kunststoffen*. In: *Jubiläumsband 50 Jahre Fakultät Bauingenieurwesen*. Bauhaus-Universität Weimar, 2004.
- [53] LINNE, S.: *Verbindungen bei modularen Flächentragwerken aus FVK*. In: *2. Forschungsforum Bd.1. Stuttgart: FOMEKK, ITKE, DLR, 2004*.
- [54] LINNE, S.; KRAUSE, T.: *Kunststoffe aus Thüringen*. K-Zeitung, 10, S. 29-30, 2004.
- [55] LINNE, S.; KRAUSE, T.: *MYKO*. Bauwelt, Wochenschau, 19, S. 6, 2004.
- [56] LINNE, S.; KRAUSE, T.: *MYKO - Ei(n)Haus aus Kunststoff für Kleinveranstaltungen*. Kunststoffverarbeitung Deutschland, Vol. 9, S. 36-37, September 2004.
- [57] LINNE, S.; KRAUSE, T.: *MYKO - Konzept eines preiswerten, mobilen Ausstellungspavillons aus GFK*. In: *Struktur, Fassaden, Trends*, Münster, 2005.
- [58] BAYER, V.; GENZEL, E.; HEIDENREICH, C.; KRAUSE, T.; LINNE, S.; VOIGT, P.: *Abschlussbericht - Forschungsgruppe Materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren*

*mit faserverstärkten Kunststoffen - FOMEKK*. Technischer Bericht, Bauhaus-Universität Weimar, Dezember 2005.

- [59] VOLKERSEN, O.: *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 15 (Lfg. 1/2), S. 41-47, 1938.
- [60] VOLKERSEN, O.: *Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen*, Band 5. Energie und Technik, 1958.
- [61] GOLAND, M.; REISSNER, E.: *The Stresses in Cemented Joints*. J. Appl. Mech., 11(1), S. 17-27, 1944.
- [62] HAHN, O.: *Festigkeitsverhalten und ingenieurmäßige Berechnung von einschnittig überlappten Metallverbindungen*. Habil. Schrift, RWTH Aachen, 1975.
- [63] GAUSS, C. F.: *Theoria combinationum observationum erroribus minimis obnoxiae*, 1821.
- [64] HÜCK, M.: *Auswertung von Stichproben normalverteilter, quantitativer Merkmalsgrößen*. Mat.-wiss. u. Werkstofftech., Vol. 25, S. 20-29, 1994.
- [65] VORMWALD, M.: *Vorlesung - Werkstoffe im Bauwesen - Werkstoffmechanik*. Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt, 2006.
- [66] BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAJEW, K.A.; MUSIOL, G.; MÜHLIG, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 5. Auflage, 2001.
- [67] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: *Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren*. Technischer Bericht, Beuth Verlag, Berlin, Mai 1986.
- [68] DIN EN ISO 1172: *Prepregs, Formmassen und Laminate - Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 1998.
- [69] ERHARD, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*. Hanser Verlag, München, 2004.
- [70] TRUMPF, H.; SEDLACEK, G.: *Tragkonstruktionen aus Faserverbundkunststoffen im Bauwesen: Out-of-area Leichtbaubrücke aus glasfaserverstärkten Polymerprofilen*. In: *Tagungsbeilage*, Winterthur, ZHAW (Hrsg.), 2002.
- [71] SIKADUR 330: *Technisches Merkblatt*. Sika Deutschland GmbH, Oktober 2006.
- [72] VALLÉE, T.; KELLER, T.: *Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part I: stress-strain analysis and failure modes*. Composites: Part B engineering, Vol. 36, S. 331-340, 2005.

## Literaturverzeichnis

- [73] VALLÉE, T.; KELLER, T.: *Adhesivly bonded lap joins from pultruded GFRP profiles. Part II: jointstrength prediction*. Composites: Part B engineering, Vol. 36, S. 341-350, 2005.
- [74] DIN EN ISO 527: *Teil 2 - Kunststoffe, Bestimmung der Zugeigenschaften, Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1996.
- [75] DIN EN ISO 527: *Teil 4 - Kunststoffe, Bestimmung der Zugeigenschaften, Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 1997.
- [76] SIKA ANCHORFIX 1: *Technisches Merkblatt*. Sika Deutschland GmbH, Mai 2009.
- [77] FRANKEN, H. W.: *Ausarbeitung eines Berechnungsverfahrens für GFK - Profilplatten auf Grund der Auswertung von Traglastversuchen*, Band T 2675. Fraunhofer IRB Verlag, 1995.
- [78] ISSLER, L.; RUOSS, H.; HÄFELE, P.: *Festigkeitslehre - Grundlagen*. Springer Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2003.
- [79] HÄNEL, B.; HAIBACH, E.; SEEGER, T.; WIRTHGEN, G.; ZENNER, H.: *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile*. VDMA Verlag, Frankfurt, 5. Auflage, 2003.
- [80] DIN EN 10088-2: *Nichtrostende Stähle - Teil 2: Techn. Lieferbedingungen für Blech u. Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005.
- [81] *Merkblatt 821 Edelstahl Rostfrei - Eigenschaften*. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 4. Auflage, 2006.
- [82] MINI, P.; MILLER, S.: *Versuche an Klebeverbindungen mit GFK-Profilen*. Professur für Tragkonstruktionen, ETHZ - Department Architektur, April 2002.
- [83] DIN EN 14869-2: *Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeiteile*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 2004.
- [84] WEIRAUCH, J.: *persönliche Mitteilung, 3M Deutschland GmbH, 16.03.2009*.
- [85] DIN EN ISO 6892: *Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2007.
- [86] DIN 18820: *Teil 2 - Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und*

*Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA) - Physikalische Kennwerte der Regellamine.* Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1991.

- [87] SCHLIMMER, M.; BORNEMANN, J.; BIEKER C.; BARTHEL C.: *Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen.* Adhäsion - Kleben & Dichten, Jg. 48, Teil 1 H5, S. 30-33, 2004; Teil 2 H6, S. 40-43; Teil 3 H7/8, S. 38-42; Teil 4 H9, S. 42-45; Teil 5 H10, S. 43-47; Teil 6 H11, S. 38-42; Teil 7 H12, S. 36-42; Teil 8 Jg. 49, H1/2, S. 38-41, 2005; Teil 9 H3, S. 44-49.
- [88] BARDENHEIER, R.: *Das Anstrengungsverhalten polymerer Werkstoffe infolge mechanisch mehraxialer Beanspruchungen.* Doktorarbeit, TH Darmstadt, 1981.
- [89] DORN, C.: *Modellierung von Stahl - GFK- Klebverbindungen.* Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, September 2007.
- [90] VDI 2014: *Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund.* VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [91] DIN EN 2561: *Luft- und Raumfahrt - Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe - Unidirektionale Lamine, Zugprüfung in Faserrichtung.* Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 1995.
- [92] G. ACKERMANN U.V.A.: *BÜV - Empfehlung Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen [TKB] - Entwurf, Bemessung und Konstruktion.* Bau-Überwachungsverein e.V., Oktober 2002.
- [93] PIESCHEL, D.; SCHNEIDER, W.: *Prüfen und Beurteilen von Kunststoff-Klebverbindungen.* In: *Klebstoffe und Klebverfahren für Kunststoffe.* VDI-Verlag, 1974.
- [94] BROCKMANN, W.; GEISS, P.L.; KLINGEN, J.; SCHRÖDER, B.: *Klebtechnik, Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren.* WILEY-VCH Verlag GmbH u. Co. KGaA, Weinheim, 2005.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Sandwichkernstrukturen, 1. Hartschaumstoff, 2. Wabenkern, 3. Stege bzw. Profile [16] . . . . .	19
2.2	links: GFK-Dach „Les Echanges“ mit Schirmen aus zusammengesetzten HP-Schalen zur Expo´64 Lausanne, HOSSDORF [20]; rechts: Fly´s Eye nach FULLER mit $d = 3,66$ m, Sebastopol 2002, Quelle: <a href="http://www.bfi.org">www.bfi.org</a> . . . . .	21
2.3	links: fahrbares Tonnengewölbe über der Schwefelgewinnungsanlage in Pomezia (b. Rom), R. PIANO 1966; rechts: Faltstruktur von BENJAMIN und MAKOWSKI, Surrey (GB) 1968 [21] . . . . .	22
2.4	Tonnenschalen als Faltwerkstrukturen [21] . . . . .	22
2.5	transluzente 2,5 mm dünne Tonnenschale mit verschraubten Hyparteilflächen als Schwimmbadüberdachung, Spannweite 15 m, Lincoln (GB) 1968 [21] . . . . .	23
2.6	Dach der Markthalle St. Ouen (b. Paris) aus 20 Kuppelschalen, 7 mm GFK, 18 m Durchmesser, DU CHÂTEAU 1968 [21] . . . . .	24
2.7	links: Punktgestütztes Dach aus transluzenter Schubstegplatte, Thun (CH) 1960, [27]; rechts: GFK-Stahl-Verbundbrücke mit GFK-Platte als Zuggurt, Winterthur 2009, [26] . . . . .	24
2.8	links: D-Tower von NOX ARCHITECTS, BOLLINGER / GROHMANN, Doetinchem (NL) 2004, Quelle: <a href="http://www.deskproto.com">www.deskproto.com</a> ; rechts: dünne Buckelschale von ISLER (CH) 1985, [20] . . . . .	25
2.9	Handlaminieren mit 1. Erzeugnis, 2. Gelcoat, 3. Trennmittel, 4. Negativform, 5. Laminierwerkzeug [16] . . . . .	26
2.10	links: Vakuumsackverfahren mit 1. und 2. verstärkte Form, 3. Erzeugnis, 4. Spannvorrichtung, 5. Vakuumsack, 6. Dichtungsrahmen, 7. Vakuumleitung [29]; rechts: Funktionsschichten beim Vakuumsackverfahren [30] . . . . .	27
2.11	Konstruktive Abstände für mehrreihige Bolzen-, Niet- und Durchsteckverbindungen [32] . . . . .	30
2.12	Auslegungsdiagramm für Bolzen-, Niet- und Durchsteckverbindungen [32] . . . . .	31
2.13	Einfluss einer Faserumleitung und Blechverstärkung auf die Lochlaibungsfestigkeit [32] . . . . .	32

2.14	Versagensbilder und Schätzformeln zur Vordimensionierung von Bolzen-, Niet- bzw. Durchsteckverbindungen [32] . . . . .	33
2.15	Prinzipielle Konstruktionsbeispiele für Schlaufenverbindungen [32] . . . . .	34
2.16	Augen- und Parallelschlaufe [32] . . . . .	34
2.17	Spannungsverläufe einer UD-Schlaufe mit $R_a/R_i=1,56$ ; links: entlang des Bolzens bei $R_i$ ; rechts: radial über die Schlaufendicke [32] . . . . .	35
2.18	Einflüsse auf das Kleben . . . . .	37
2.19	Gliederung der Klebstoffe nach dem Abbinde Mechanismus [14] . . . . .	38
2.20	prinzipielles Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Klebschichten mit unterschiedlichen Verformungseigenschaften [14] . . . . .	39
2.21	Forum Soft zur EXPO.02 (Yverdon-Les-Bains, CH) mit elastischen Verklebungen . . . . .	41
2.22	Verfahren der Oberflächenbehandlung [14] . . . . .	47
2.23	normierte Lösungsmittelpolaritäten [43] . . . . .	49
2.24	Spannungsverteilung in geschweißten, genieteten und geklebten Verbindungen längs der Bauteilfuge [32] . . . . .	51
2.25	Gestaltung mechanisch belasteter Klebverbindungen [32] . . . . .	51
2.26	Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke [14] . . . . .	52
2.27	Schälende Normalspannungen am Klebeverbindungsende infolge Anschlussmoment bei einfacher Überlappung [32] . . . . .	53
2.28	exemplarische Spannungsverteilung in Überlappungsrichtung im Klebstoff einer symmetrischen Klebeverbindung [32] . . . . .	54
2.29	Einfache Werkstoffmodelle zur rechnerischen Abbildung von Klebschichten	55
2.30	Schubspannungsverteilung in einer einfachen überlappten EP-Verklebung von Aluminium-Blechen unter biegemomentfreier Zugscherbeanspruchung [32]	55
2.31	Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Überlappungslänge [14] . . . . .	56
2.32	Spannungs- und Dehnungsverteilung in kurzen und langen zweischnittigen Überlappungen mit plastizierenden Klebstoffen [48] . . . . .	57
2.33	Fügeteilendausbildung zur Reduzierung der Schälspannungen im Klebstoff [48] . . . . .	59
2.34	Die verringerte Effizienz von unausgeglichener Steifigkeit zwischen den Fügeteilen bei einschnittig überlappten Klebungen [48] . . . . .	59
2.35	Verlauf des Schälspannungsversagens dicker Lamine [48] . . . . .	60
2.36	Bruchbildbezeichnungen von Klebungen nach DIN EN ISO 10365 [49] . . . . .	61
3.1	Spannverschluss mit beiden Lastanschlussblechen . . . . .	65
3.2	Entwurf einer Zugstangenverbindung . . . . .	65

Abbildungsverzeichnis

3.3	symmetrische Hälfte eines justierbaren Verschlussbügels mit Lastblech . . .	66
3.4	justierbarer Verschlussbügel und Lastbleche mit Schienen . . . . .	66
3.5	Randprofil001 . . . . .	68
3.6	links: MYKO 2005 in Münster beim SFT-Congress, rechts: MYKO 2004 an der Bauhaus-Universität Weimar . . . . .	68
3.7	links: MYKO Türdetail beim Belastungsversuch mit Mannlast, rechts: Verbindungsdetail an einer Hauptschale des MYKO . . . . .	69
3.8	verklebte Stahlteile der Spannverbindung des MYKO vor dem Sandstrahlen	69
3.9	Außenansicht des Chanel Mobil Art Pavillon 08, Quelle: BORSTELMANN, ZAHA HADID ARCHITECTS, London . . . . .	71
3.10	links: GFK-Module mit geklebten und schraubengesicherten Verbindungsblechen auf Paletten für Containertransport, rechts: Verbindung der GFK-Module mit der Primärtragstruktur, Quelle: BORSTELMANN, ZAHA HADID ARCHITECTS, London . . . . .	71
3.11	Verbindungsdetail mit zu verklebenden Lastanschlussblechen und justierbarer Klemmkonstruktion des Chanel Mobil Art Pavillon 08, Quelle: BORSTELMANN, ZAHA HADID ARCHITECTS, London . . . . .	72
3.12	Variablendefinition an der einschnittigen Klebung nach [60] . . . . .	75
4.1	Verteilungs- und Dichtefunktion der Standard-Normalverteilung [65] . . . . .	82
4.2	Beispiel eines Wahrscheinlichkeitsnetzes, aus [13] . . . . .	83
4.3	Querschnitt des verwendeten GFK-Sandwichs . . . . .	84
4.4	links: Stahlblech Typ I, rechts: Stahlblech Typ Ia . . . . .	85
4.5	CAD-Zeichnung für Typ I . . . . .	86
4.6	CAD-Zeichnung für Typ Ia . . . . .	86
4.7	Stahlblech Typ II links: Ansicht, rechts: CAD-Zeichnung . . . . .	87
4.8	Probekörper der Serien A, B und C auf kompakter Grundplatte 350×200 mm	88
4.9	Herstellung des Auflaminats für die Proben, links: Serie E, rechts: Serie F .	88
4.10	Prüfstände der bauteilähnlichen Proben, links: Versuchsstand TIRATEST 28100, rechts: individueller Prüfrahmen . . . . .	91
4.11	Wegmessung an den Proben der Serien D - F . . . . .	91
4.12	Spannungsverteilung in einschnittig überlappter Verklebung mit elastischem (links) und viskoelastischem Klebstoffverhalten (rechts) [14] . . . . .	95
4.13	links: Gebinde für Sikadur-31 CF Normal und Sika Cleaner 205, rechts: Sikabond-T14 . . . . .	97
4.14	Gebinde für die Klebstoffe - links: gefülltes Laminierharz VIA-PAL UP 242 BMT/57, rechts: UHU plus multifest . . . . .	98

4.15 links: 3M Scotch-Weld DP490, rechts: Schleifvlies Scotch Brite 747 . . . . .	98
4.16 links: mit Schleifvlies vorbereitete Fügepartner, rechts: Sikadur 330 u. Reiniger Sika Colma . . . . .	98
4.17 Zugscherprobe einschnittig mit 12 mm Klebelänge . . . . .	99
4.18 Zugscherprobe einschnittig mit 24 mm Klebelänge . . . . .	100
4.19 Zugscherprobe zweisechnittig mit 12 mm Klebelänge . . . . .	100
4.20 links: Scotch Brite Schleifvliespad very fine, rechts: vorbereitete Oberflächen für Verklebung mit UHU plus multifest . . . . .	101
4.21 Probekörper der Serie MA12EB . . . . .	103
4.22 links: Probekörper der Serie UP12EA, rechts: PUR12EB . . . . .	103
4.23 links: Detail einer DP490 12EB-Probe, rechts: Probekörper SI330 12EA . . . . .	103
4.24 Ausbildung der Übergangsradien an einem zweisechnittigen Prüfkörper mit $r = 0,75$ mm . . . . .	105
4.25 links: Zugscherversuche an einer Zwick Z100 der MFPA Weimar, rechts: Probekörper unmittelbar vor (MA12EB2, MA24EB2) bzw. im Versagenszustand (UP12ZA5) . . . . .	107
4.26 Experimentell ermittelte Bruchkräfte an geklebten Zugscherproben . . . . .	110
4.27 Kraft-Weg-Diagramm der einschnittigen Proben mit 12 mm Klebelänge bei $L_0 = 28$ mm . . . . .	111
4.28 Kraft-Weg-Diagramm der einschnittigen Proben mit 24 mm Klebelänge bei $L_0 = 28$ mm . . . . .	113
4.29 Kraft-Weg-Diagramm der zweisechnittigen Proben mit 12 mm Klebelänge bei $L_0 = 28$ mm . . . . .	113
4.30 typische Bruchbilder links: MA-Verklebungen, rechts: SI31-Verklebungen . . . . .	114
4.31 Bruchbilder links: SI330 12EA, rechts: SI330 12EB . . . . .	114
4.32 Bruchbilder DP490-12EB . . . . .	114
4.33 Bruchbilder links: DP490 24EB, rechts: DP490 24EBS . . . . .	115
4.34 typische Bruchbilder links: PUR-Verklebungen, rechts: UP-Verklebungen . . . . .	115
4.35 Geometrie der Klebstoffschulterstäbe . . . . .	119
4.36 DP490- und SI330-Substanzproben für Zugversuche . . . . .	120
4.37 Versuchsdurchführung an einer Z100 der MFPA Weimar (MA, GFK.0 und PUR) . . . . .	121
4.38 Zugversuch 3M DP 490 mit 4 %/min . . . . .	121
4.39 Spannungs- und Dehnungsbruchwerte der Zugversuche an Substanzproben mit Angabe der Mittel- und bemessungsrelevanten Quantilwerte . . . . .	123

Abbildungsverzeichnis

4.40	$\sigma - \varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der DP490-Schulterstäbe mit $v = 2,0$ mm/min bezogen auf $L_0 = 50$ mm, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon = 0,05$ und $0,25\%$ , ( $n = 7$ ) . . . . .	127
4.41	$\sigma - \varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen mit linearer Ausgleichsgerade der SI330-Schulterstäbe mit $v = 0,5$ mm/min bezogen auf $L_0 = 50$ mm, ( $n = 7$ ) . . . . .	127
4.42	$\sigma - \varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der MA-Schulterstäbe mit $v = 0,5$ mm/min bezogen auf $L_0 = 50$ mm, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon = 0,05$ und $0,25\%$ , ( $n = 10$ ) . . . . .	128
4.43	Anfang der mittleren $\sigma - \varepsilon$ -Kurve aus Zugversuchen der 1.4301-Flachproben, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon = 0,05$ und $0,25\%$ , ( $n = 4$ ), $R_m = 737$ MPa, $\varepsilon_M = 55\%$ . . . . .	128
4.44	$\sigma - \varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der GFK.0-Streifenproben mit $v = 0,5$ mm/min bezogen auf $L_0 = 50$ mm, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon = 0,05$ und $0,25\%$ , ( $n = 6$ ) . . . . .	129
4.45	Bruchbilder und Versuchsanordnung der interlaminaren Zugversuche an GFK-Rundproben $d = 50$ mm . . . . .	129
5.1	Modellgeometrie der Zugscherversuche mit 12 mm Überlappung . . . . .	136
5.2	Modellausschnitt der FE-Vernetzung der Zugscherprobe mit $l_{\bar{u}} = 12$ mm . . . . .	138
5.3	Netzdetail mit Pfaden der Zugschermodelle . . . . .	140
5.4	$\sigma_y$ am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der DP490-12E-Zugscherprobe . . . . .	142
5.5	$\tau_{xy}$ am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der DP490-12E-Zugscherprobe . . . . .	142
5.6	$\sigma_y$ (0 bis 45) für DP490-12E - Ende GFK-Fügeteil - Vergleich der Netzfeinheit . . . . .	143
5.7	$\sigma_y$ am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der SI330-12E-Zugscherprobe . . . . .	144
5.8	$\tau_{xy}$ am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der SI330-12E-Zugscherprobe . . . . .	145
5.9	$\sigma_y$ am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der DP490-24E-Zugscherprobe . . . . .	146
5.10	$\tau_{xy}$ am 1,0-fachen Verformungsplot für den zentralen Teil der DP490-24E-Zugscherprobe . . . . .	146
5.11	Grundgeometrie des realitätsnahen Kraftanschlusspunktes VAR01 . . . . .	148
5.12	Pfaddefinition am realitätsnahen Kraftanschlusspunkt am rechten Blechrand (VAR01-07, VAR09) . . . . .	152

5.13	Pfaddefinition am realitätsnahen Kraftanschlusspunkt an rechter Blechvoute (VAR08, VAR10) . . . . .	152
5.14	Entwicklung der Auflagerkräfte über $\max \sigma_{ref}$ im GFK und $\max \sigma_v$ im DP490 in der Grundvariante VAR01 . . . . .	154
5.15	$\tau_{xy}$ (-22 bis 9) für VAR01 - Grundvariante . . . . .	155
5.16	$\sigma_y$ (-20 bis 39) für VAR01 - Grundvariante . . . . .	155
5.17	$\tau_{xy}$ (-19 bis 11) für VAR02 - Blechdicke 4 mm . . . . .	155
5.18	$\sigma_y$ (-18 bis 47) für VAR02 - Blechdicke 4 mm . . . . .	156
5.19	$\tau_{xy}$ (-25 bis 18) für VAR03 - Laminatdicke 10 mm . . . . .	156
5.20	$\sigma_y$ (-22 bis 29) für VAR03 - Laminatdicke 10 mm . . . . .	156
5.21	$\tau_{xy}$ (-21 bis 12) für VAR04 - Klebschichtdicke 0,28 mm . . . . .	157
5.22	$\sigma_y$ (-20 bis 40) für VAR04 - Klebschichtdicke 0,28 mm . . . . .	157
5.23	$\tau_{xy}$ (-22 bis 10) für VAR05 - Blechlänge 50 mm . . . . .	157
5.24	$\sigma_y$ (-9 bis 35) für VAR05 - Blechlänge 50 mm . . . . .	158
5.25	$\tau_{xy}$ (-60 bis 15) für VAR06 - Klebstoff SI330 . . . . .	158
5.26	$\sigma_y$ (-23 bis 45) für VAR06 - Klebstoff SI330 . . . . .	158
5.27	$\tau_{xy}$ (-20 bis 10) für VAR07 - Lastangriff vorn . . . . .	159
5.28	$\sigma_y$ (-17,5 bis 35) für VAR07 - Lastangriff vorn . . . . .	159
5.29	$\tau_{xy}$ (-30 bis 15) für VAR08 - gevoutet . . . . .	159
5.30	$\sigma_y$ (-15 bis 30) für VAR08 - gevoutet . . . . .	160
5.31	$\tau_{xy}$ (-23 bis 14) für VAR09 - kurze freie Laminatlänge . . . . .	160
5.32	$\sigma_y$ (-25 bis 35) für VAR09 - kurze freie Laminatlänge . . . . .	160
5.33	Geometrie des Kombinationsmodells VAR10 . . . . .	162
5.34	Sensitivität der Auswertekriterien und Bestimmung der maximalen Reaktionskraft $\Sigma F_x = 542,83 \text{ N/mm}$ für VAR10 . . . . .	163
5.35	Materialdefinition im Modell VAR10 . . . . .	164
5.36	$\tau_{xy}$ (-27 bis 18) für die Gesamtblechansicht des VAR10 - Kombinationsmodells . . . . .	165
5.37	$\sigma_y$ (-22 bis 32) für die Gesamtblechansicht des VAR10 - Kombinationsmodells . . . . .	165
5.38	1-facher Verformungsplot mit den Spannungen $\sigma_x$ (-200 bis 200) und einer qualitativen Darstellung der Lagerkraftvektoren des VAR10 - Kombinationsmodells . . . . .	165
6.1	Ablauf der Bemessung einer strukturellen GFK-Stahl-Klebeverbindung . . . . .	172
A.1	Versuchsstand und Bruchbild Versuch A4 . . . . .	196
A.2	Bruchbilder der Serie A . . . . .	196
A.3	Serie A: Kraft - Weg - Diagramm . . . . .	197

Abbildungsverzeichnis

A.4	Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie A	197
A.5	links: Versuchsstand Serie B, rechts: beginnender Bruch B0	198
A.6	Versagensentwicklung Versuch B2	198
A.7	Serie B: Kraft - Weg - Diagramm	199
A.8	BruchversuchB001	199
A.9	Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie B	200
A.10	Versuchsstand Serie C	201
A.11	Bruchbild Probekörper C3	201
A.12	Versagensentwicklung Versuch C2	202
A.13	Serie C: Kraft - Weg - Diagramm	202
A.14	Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie C	203
A.15	Versuchsordnung Serie D	204
A.16	Versagensentwicklung Versuch D5	204
A.17	Serie D: Kraft - Weg - Diagramm, Wegmessung an GFK-Platte oberhalb Klemmlager	205
A.18	Serie D: vertikaler Weg - Zeit - Diagramm	205
A.19	Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie D	206
A.20	li: Versuchsordnung Serie E mit horizontalem Wegaufnehmer, re: Bruchdetail E6	207
A.21	Versagensentwicklung E1	207
A.22	Versagensentwicklung E4	208
A.23	Serie E: Kraft - Weg - Diagramm, Wegmessung an GFK-Platte oberhalb Klemmlager	208
A.24	Serie E: vertikaler Weg - Zeit - Diagramm	209
A.25	Serie E: Kraft - Weg - Diagramm der Verformung der GFK-Platte senkrecht zur Krafrichtung	209
A.26	Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie E	210
A.27	Versagensentwicklung F2	211
A.28	Versagensentwicklung F4	211
A.29	Bruchbild F1	212
A.30	Bruchbild F3	212
A.31	Serie F: Kraft - Weg - Diagramm	213
A.32	Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie F	213
B.1	Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Bruchflächendetail des DP490 ermittelt an der dicken überlappten Zugscherprobe nach DIN 14689-2:2004 [84, 94]	215

C.1	Streifenproben Edelstahl 1.4301 (links) und GFK 0°-Ausrichtung (rechts) . . .	216
C.2	Streifenprobe GFK.45° (links) und Schulterstab UP (rechts) . . . . .	216
C.3	Schulterstäbe MA (links] und Anchorfix1 (rechts) . . . . .	216
C.4	Bruchbilder der unter 0° (links) und 45° ausgerichteten GFK-Substanzproben (rechts) . . . . .	217
C.5	Bruchbilder PUR (links) und gefülltes UP-Harz (rechts) . . . . .	217
C.6	Bruchbilder der SI31-Schulterstäbe . . . . .	217
C.7	Bruchbilder der SI30-Schulterstäbe . . . . .	218
C.8	Bruchbilder Anchorfix1 (links) und SI330 (rechts) . . . . .	218
C.9	Bruchbilder aus Zugversuchen an MA-Substanzproben . . . . .	218
C.10	Bruchbilder aus Zugversuchen an DP490-Substanzproben (links) und einer repräsentativen 1.4301-Streifenprobe (rechts) . . . . .	219
C.11	$\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der GFK.45-Streifenproben mit $v=0,5$ mm/min bezogen auf $L_0=50$ mm, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon=0,05$ und $0,25\%$ , ( $n=8$ ) . . . . .	219
C.12	$\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der PUR-Schulterstäbe mit $v=200$ mm/min, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon=1$ und $10\%$ , ( $n=5$ ) . . . . .	220
C.13	$\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der SI31-Schulterstäbe mit $v=0,5$ mm/min bezogen auf $L_0=50$ mm, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon=0,05$ und $0,25\%$ , ( $n=9$ ) . . . . .	220
C.14	$\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der SI30-Schulterstäbe mit $v=0,5$ mm/min bezogen auf $L_0=50$ mm, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon=0,05$ und $0,25\%$ ( $n=2$ ), $\varepsilon=0,20\%$ ( $n=1$ ), $0,16\%$ ( $n=5$ ) . . . . .	221
C.15	$\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der UP-Schulterstäbe mit $v=0,5$ mm/min bezogen auf $L_0=50$ mm, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon=0,05$ und $0,16\%$ , ( $n=7$ ) . . . . .	221
C.16	$\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der Anchorfix1-Streifenproben mit $v=0,5$ mm/min bezogen auf $L_0=50$ mm, E-Modul als Sekante zwischen $\varepsilon=0,05$ und $0,25\%$ ( $n=6$ ), $0,16\%$ ( $n=2$ ) . . . . .	222
C.17	$\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm der Interlaminaren Zugversuche mit $v=1,0$ mm/min (Tra- versenweg) bezogen auf $L_0=2,5$ mm, Mittelwert der Sirnzugfestigkeit $\sigma=14,7$ MPa . . . . .	222
E.1	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 der Zugscherprobe DP490-12E . . . . .	227
E.2	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 der Zugscherprobe DP490-12E . . . . .	227

Abbildungsverzeichnis

E.3	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 der Zugscherprobe DP490-12E . . . . .	228
E.4	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 der Zugscherprobe DP490-12E . . . . .	228
E.5	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 der Zugscherprobe DP490-12E . . . . .	228
E.6	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 6 der Zugscherprobe DP490-12E . . . . .	229
E.7	links: $\varepsilon_y$ (-0,9 E-03 bis 0,0081) im GFK, rechts: $\sigma_y$ (0 bis 27) für DP490-12E - Ende Stahl-Fügeteil . . . . .	229
E.8	links: $\tau_{xy}$ (-22 bis 9) Ende Stahl, rechts: $\tau_{xy}$ (-23 bis 22) Ende GFK für DP490-12E . . . . .	229
E.9	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 der Zugscherprobe SI330-12E . . . . .	230
E.10	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 der Zugscherprobe SI330-12E . . . . .	230
E.11	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 der Zugscherprobe SI330-12E . . . . .	231
E.12	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 der Zugscherprobe SI330-12E . . . . .	231
E.13	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 der Zugscherprobe SI330-12E . . . . .	231
E.14	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 6 der Zugscherprobe SI330-12E . . . . .	232
E.15	links: $\tau_{xy}$ am Ende Stahl (-80 bis 10), rechts: $\tau_{xy}$ am Ende GFK (-33 bis 12) für SI330-12E . . . . .	232
E.16	links: $\sigma_y$ am Ende Stahl (-20 bis 70), rechts: $\sigma_y$ am Ende GFK (0 bis 45) für SI330-12E . . . . .	232
E.17	links: $\varepsilon_y$ (-0,012 bis 0,007) im GFK, rechts: $\sigma_y$ (0 bis 45) im GFK für DP490-24E . . . . .	233
E.18	links: $\tau_{xy}$ (-21 bis 10,5), rechts: $\tau_{xy}$ (-22,5 bis 18) Klebefugenranddetails für DP490-24E . . . . .	233
F.1	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 des Bauteils VAR01 . .	234
F.2	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 des Bauteils VAR01 . .	234
F.3	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 des Bauteils VAR01 . .	235
F.4	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 des Bauteils VAR01 . .	235

F.5	rechter 10 mm-Randbereich von Pfad 4 des Bauteils VAR01 . . . . .	235
F.6	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 des Bauteils VAR01 . .	236
F.7	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 6 des Bauteils VAR01 . .	236
F.8	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 des Bauteils VAR05 . .	237
F.9	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 des Bauteils VAR05 . .	237
F.10	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 des Bauteils VAR05 . .	237
F.11	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 des Bauteils VAR05 . .	238
F.12	rechter 10 mm-Randbereich von Pfad 4 des Bauteils VAR05 . . . . .	238
F.13	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 des Bauteils VAR05 . .	238
F.14	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 6 des Bauteils VAR05 . .	239
F.15	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 des Bauteils VAR10 . .	240
F.16	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 des Bauteils VAR10 . .	240
F.17	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 des Bauteils VAR10 . .	240
F.18	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 des Bauteils VAR10 . .	241
F.19	berechnete Spannungen im Pfad 4 des Bauteils VAR10 im Bereich der rechten Voute . . . . .	241
F.20	berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 des Bauteils VAR10 . .	241
F.21	berechnete Spannungen in den Pfaden 5VL und 5VR des Bauteils VAR10 .	242
F.22	$\tau_{xy}$ (-27 bis 18) für linkes Blechende des VAR10 - Kombinationsmodells . .	243
F.23	$\sigma_y$ (-22 bis 32) für linkes Blechende des VAR10 - Kombinationsmodells . . .	243
F.24	$\tau_{xy}$ (-27 bis 18) für Lasteinleitungsbereich des VAR10 - Kombinationsmodells	244
F.25	$\sigma_y$ (-22 bis 32) für Lasteinleitungsbereich des VAR10 - Kombinationsmodells	244
F.26	$\tau_{xy}$ (-27 bis 18) für rechtes Blechende des VAR10 - Kombinationsmodells . .	245
F.27	$\sigma_y$ (-22 bis 32) für rechtes Blechende des VAR10 - Kombinationsmodells . .	245

## Tabellenverzeichnis

2.1	Bereiche mechanischer Kennwerte von elastischen Dickschichtverklebungen	40
4.1	5%-Quantilfaktoren bei unbekannter Standardabweichung $\sigma$ nach [67]	83
4.2	Versuchsprogramm	89
4.3	Bauteilähnliche Geometrien: Übersicht der Bruchkräfte Serien A - F	94
4.4	Zugscherversuche-Probenmatrix	104
4.5	Zugscherversuche - Quantile der Bruchkräfte F bei 75% Konfidenz, - Klebefläche A, Klebfestigkeit $\tau_b$ nach DIN EN 1465 [2] [N, mm <sup>2</sup> , N/mm <sup>2</sup> ] und Versagensform nach DIN EN ISO 10365 [49]	112
4.6	Literaturangaben zu Werkstoffkenngrößen	118
4.7	Herstellerangaben zu den mechanischen Kenngrößen des DP490 [84]	119
4.8	Technische Werkstoffkenngrößen als arithmetische Mittelwerte und Standard- abweichungen aus Zugversuchen an Substanzproben	125
4.9	Technische Werkstoffkenngrößen aus Zugversuchen für Stahl 1.4301	126
5.1	Vergleich von Versuchs- und Berechnungsergebnissen DP490-12E	141
5.2	Vergleich von Versuchs- und Berechnungsergebnissen SI330-12E	144
5.3	Vergleich von Versuchs- und Berechnungsergebnissen DP490-24E	145
5.4	Vergleichspannung der Klebstoffe und interlaminare Spannungsgrößen der be- rechneten Zugschermodelle im Pfad 2 am Ende des GFK-Fügeteils	147
5.5	Analyseprogramm zum realitätsnahen Kraftanschlusspunkt	150
5.6	Ergebnisse der Variantenstudie der realitätsnahen Bauteilgeometrie	154
6.1	Vergleich mittlerer rechnerischer Bruch- und Bemessungsgrößen nach dem Teilsicherheitskonzept für die bauteilähnliche Geometrie VAR10	170

## **Anhang**

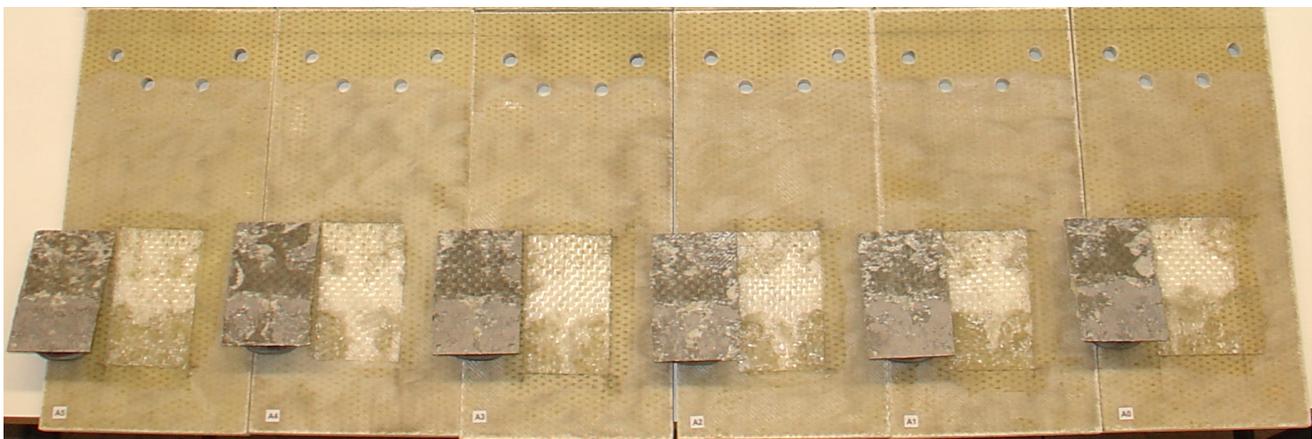
## A Versuchsdaten bauteilähnlicher Versuche

### Versuchsdaten Serie A

Die folgenden Diagramme und Abbildungen dokumentieren die Versuche an bauteilähnlichen Proben der Serie A aus sechs Einzelproben.



**Abb. A.1:** Versuchsstand und Bruchbild Versuch A4



**Abb. A.2:** Bruchbilder der Serie A

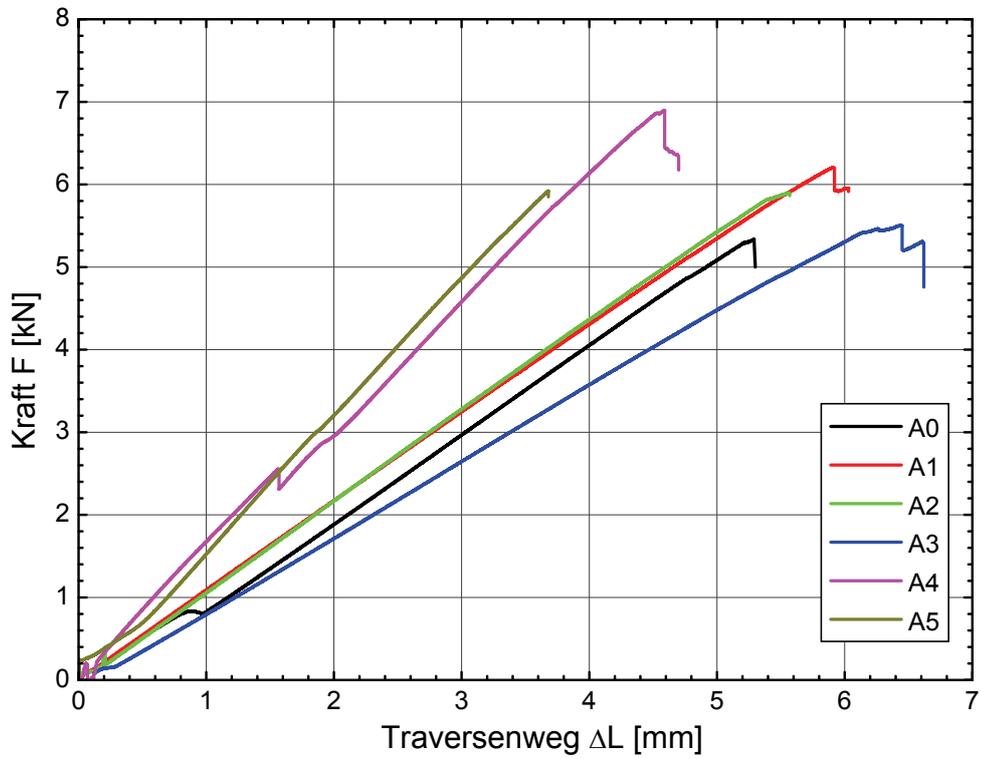


Abb. A.3: Serie A: Kraft - Weg - Diagramm

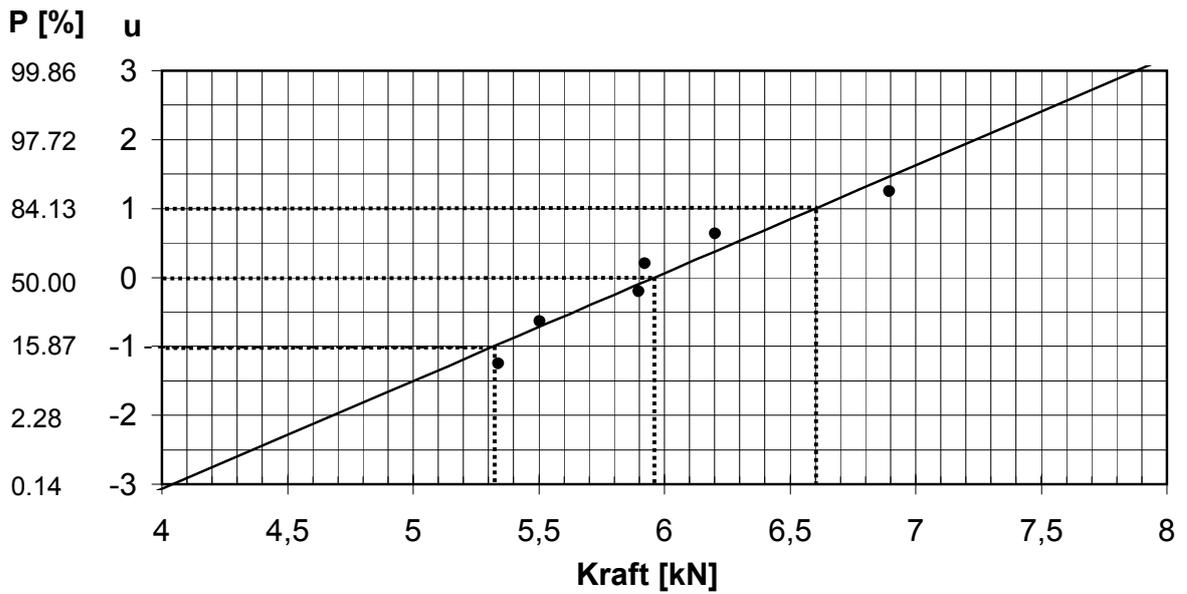
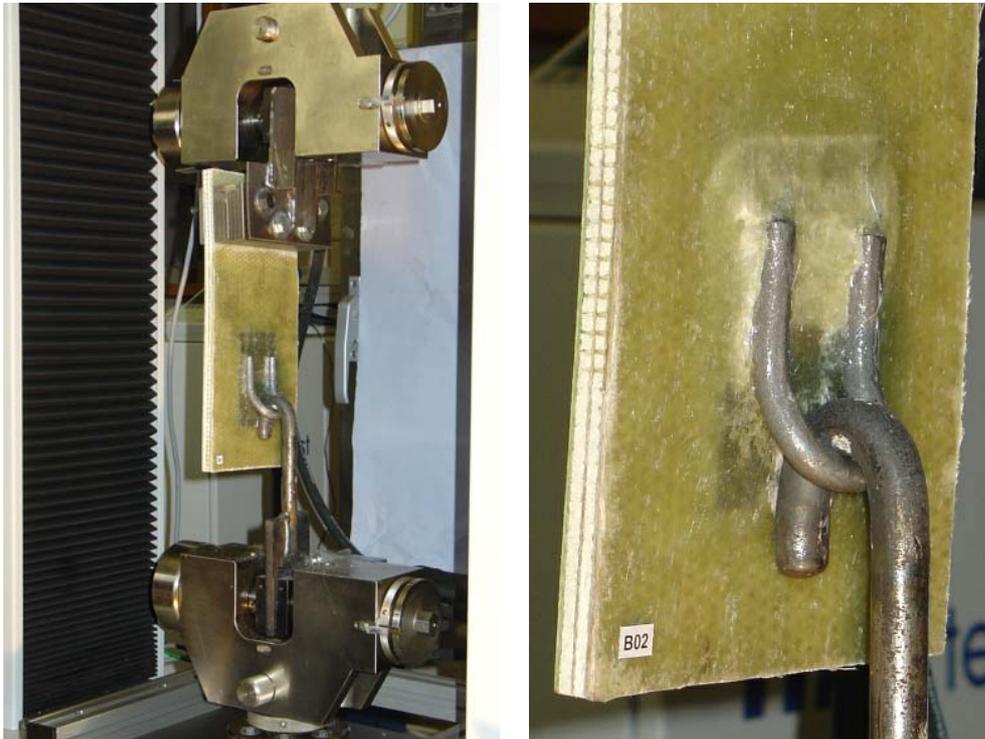


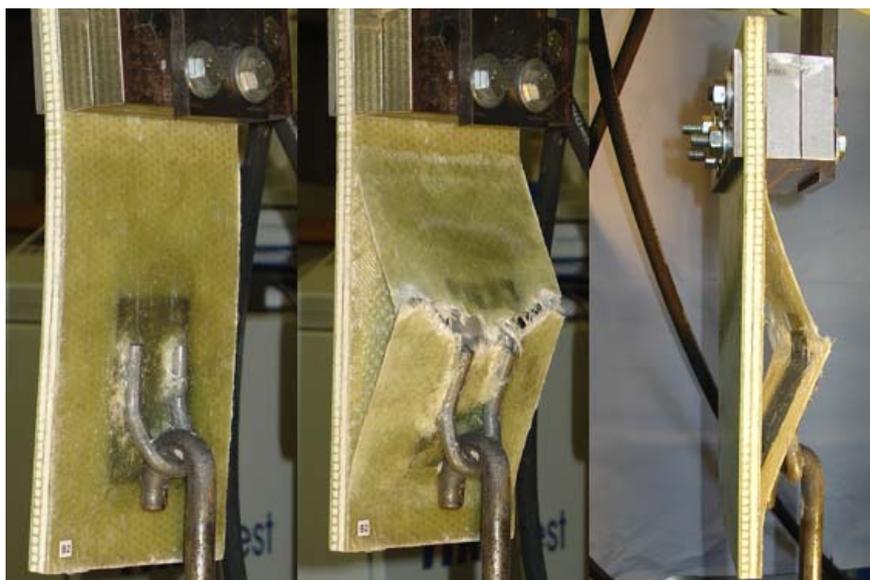
Abb. A.4: Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie A

### Versuchsdaten Serie B

Die folgenden Diagramme und Abbildungen dokumentieren die Versuche an bauteilähnlichen Proben der Serie B aus sechs Einzelproben.



**Abb. A.5:** links: Versuchsstand Serie B, rechts: beginnender Bruch B0



**Abb. A.6:** Versagensentwicklung Versuch B2

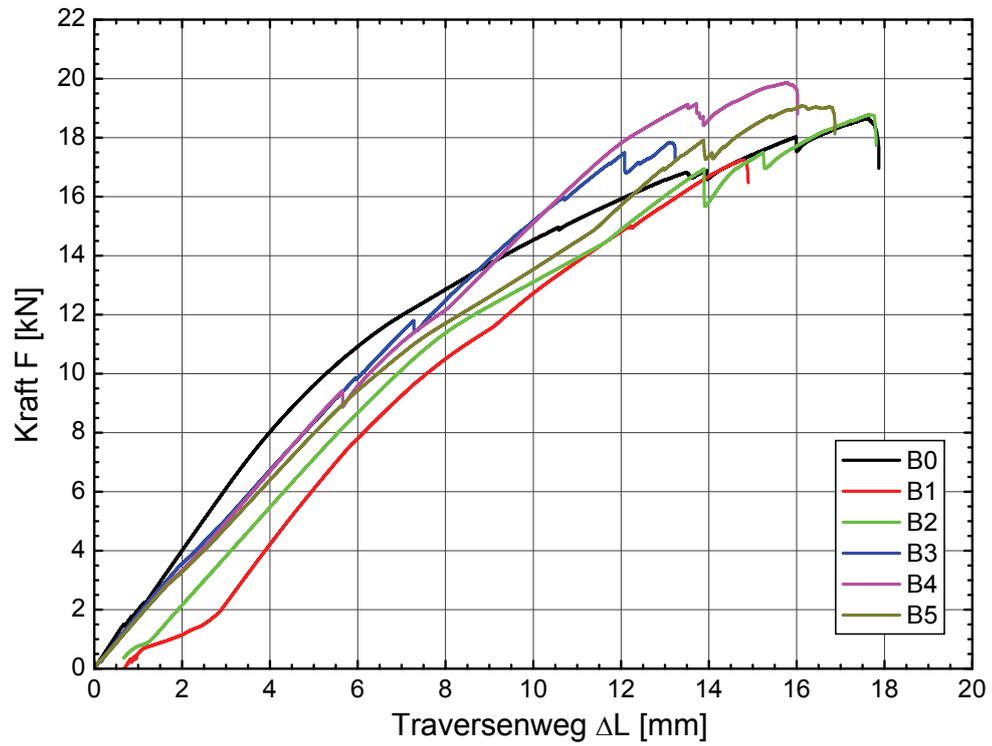


Abb. A.7: Serie B: Kraft - Weg - Diagramm



Abb. A.8: Bruchbilder Serie B

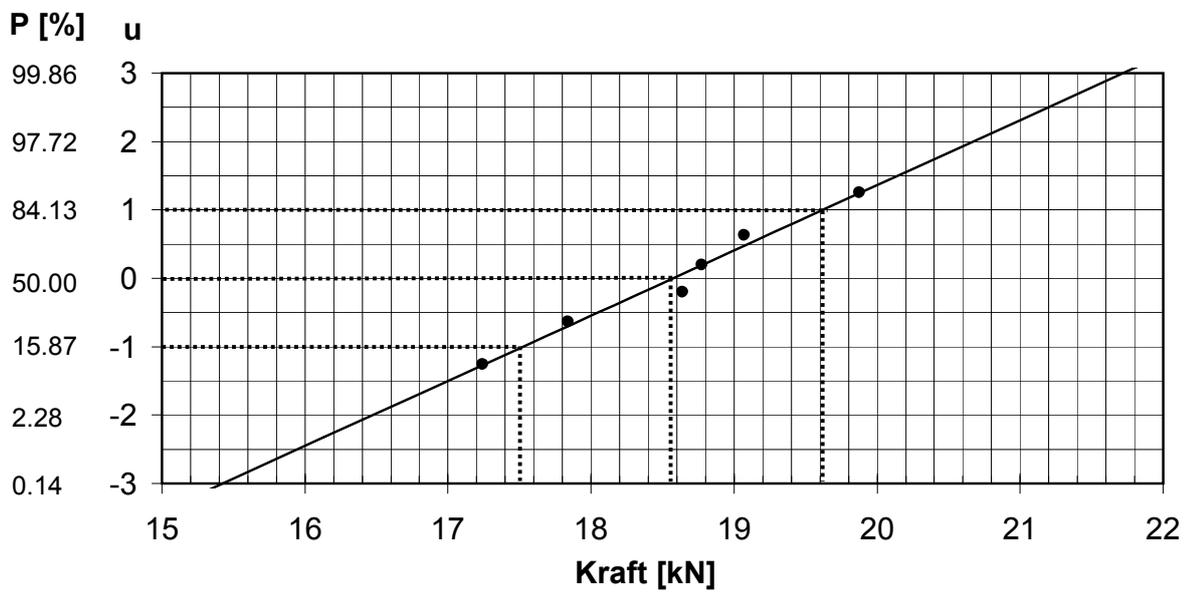


Abb. A.9: Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie B

### Versuchsdaten Serie C

Die folgenden Diagramme und Abbildungen dokumentieren die Versuche an bauteilähnlichen Proben der Serie C aus fünf Einzelproben.



**Abb. A.10:** Versuchsstand Serie C



**Abb. A.11:** Bruchbild Probekörper C3



Abb. A.12: Versagensentwicklung Versuch C2

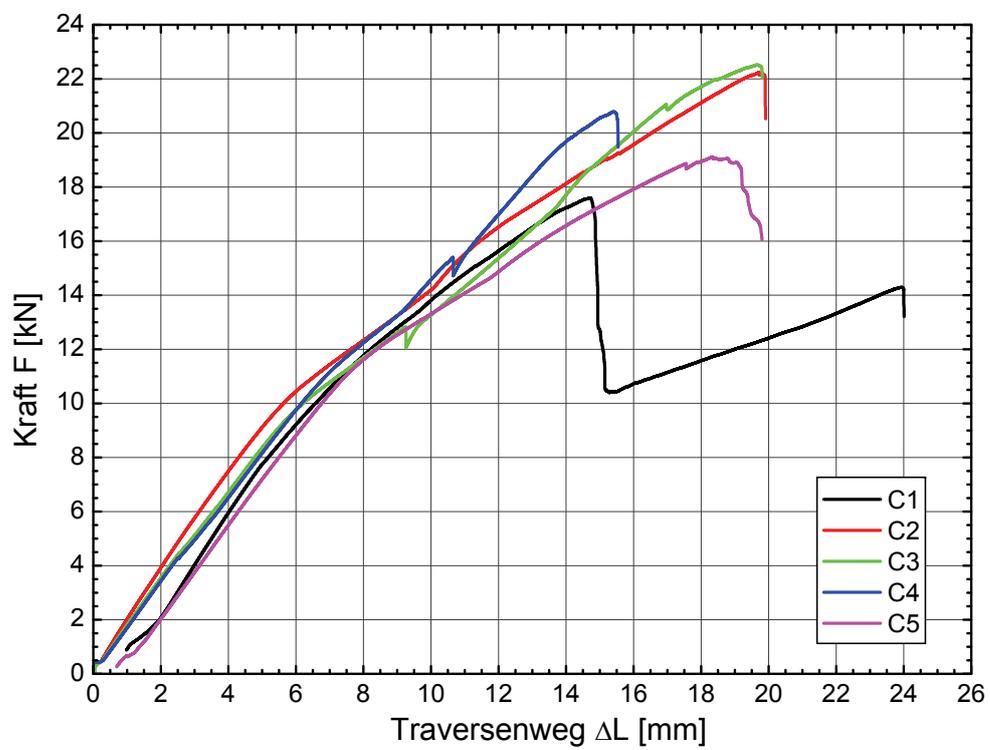


Abb. A.13: Serie C: Kraft - Weg - Diagramm

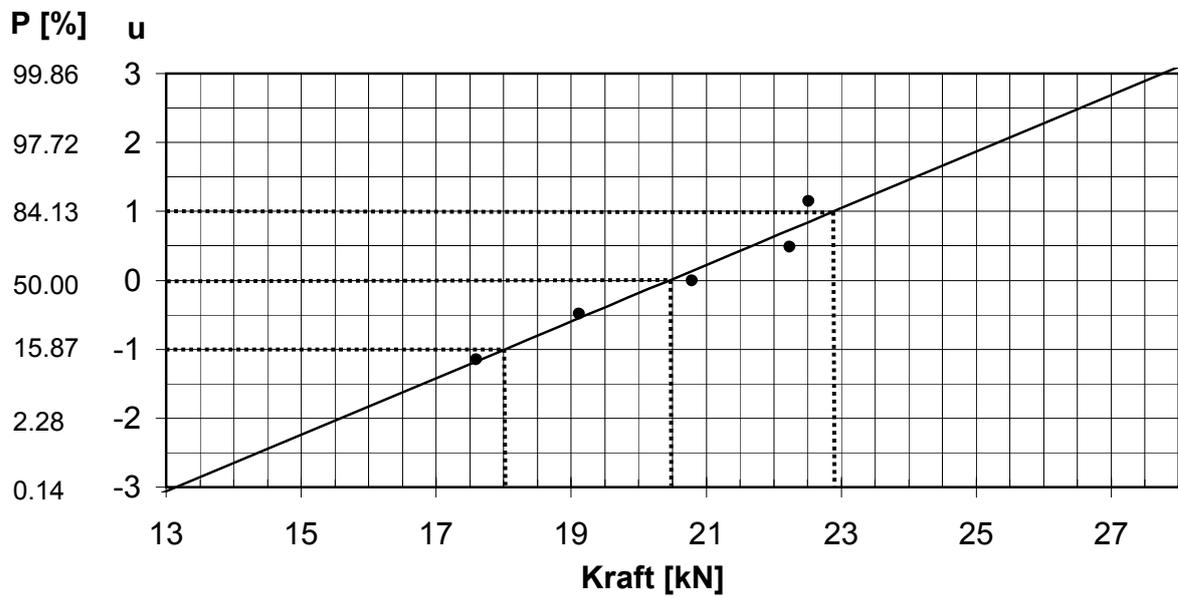


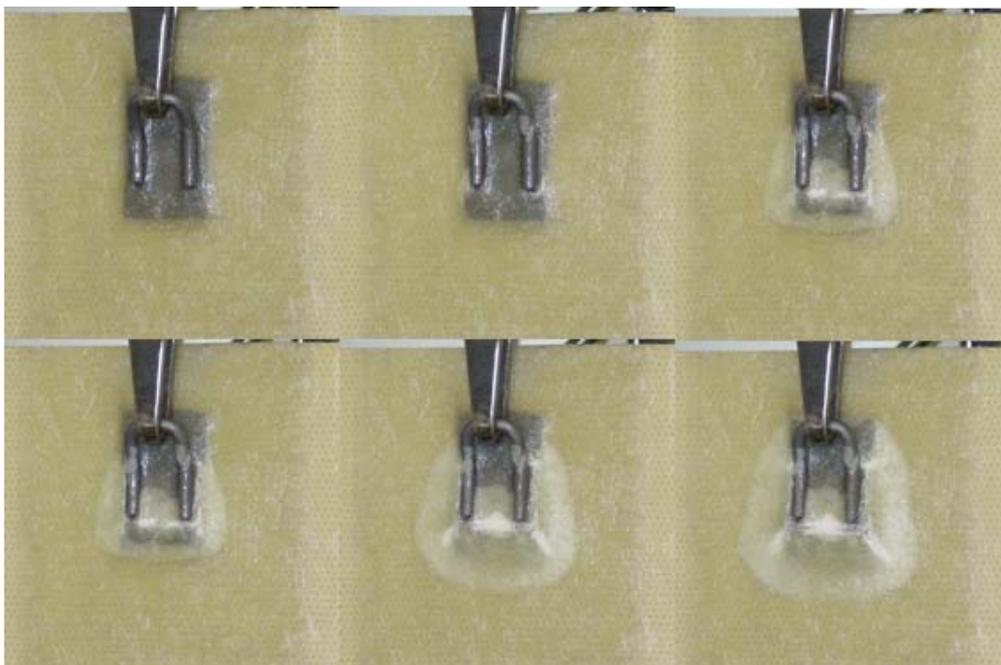
Abb. A.14: Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie C

### Versuchsdaten Serie D

Die folgenden Diagramme und Abbildungen dokumentieren die Versuche an bauteilähnlichen Proben der Serie D aus sechs Einzelproben.



**Abb. A.15:** Versuchsanordnung Serie D



**Abb. A.16:** Versagensentwicklung Versuch D5

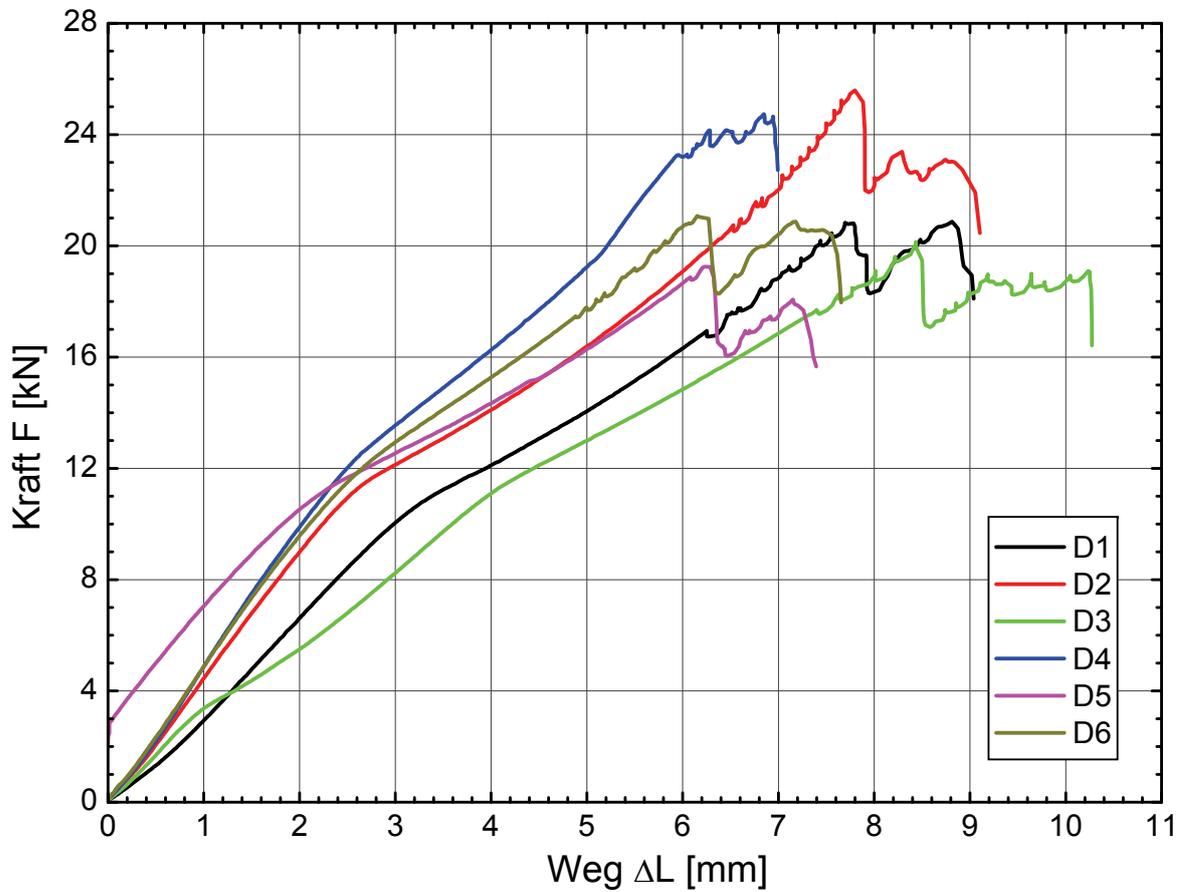


Abb. A.17: Serie D: Kraft - Weg - Diagramm, Wegmessung an GFK-Platte oberhalb Klemmlager

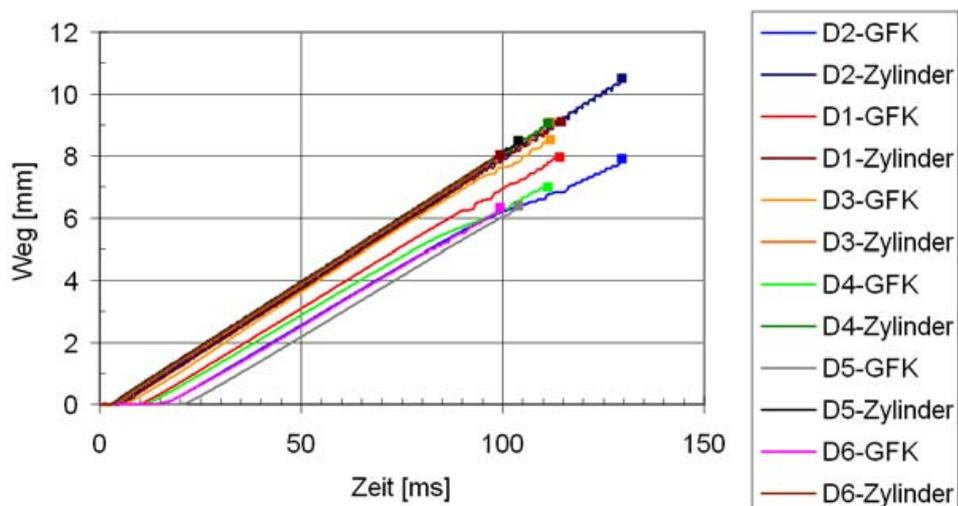


Abb. A.18: Serie D: vertikaler Weg - Zeit - Diagramm

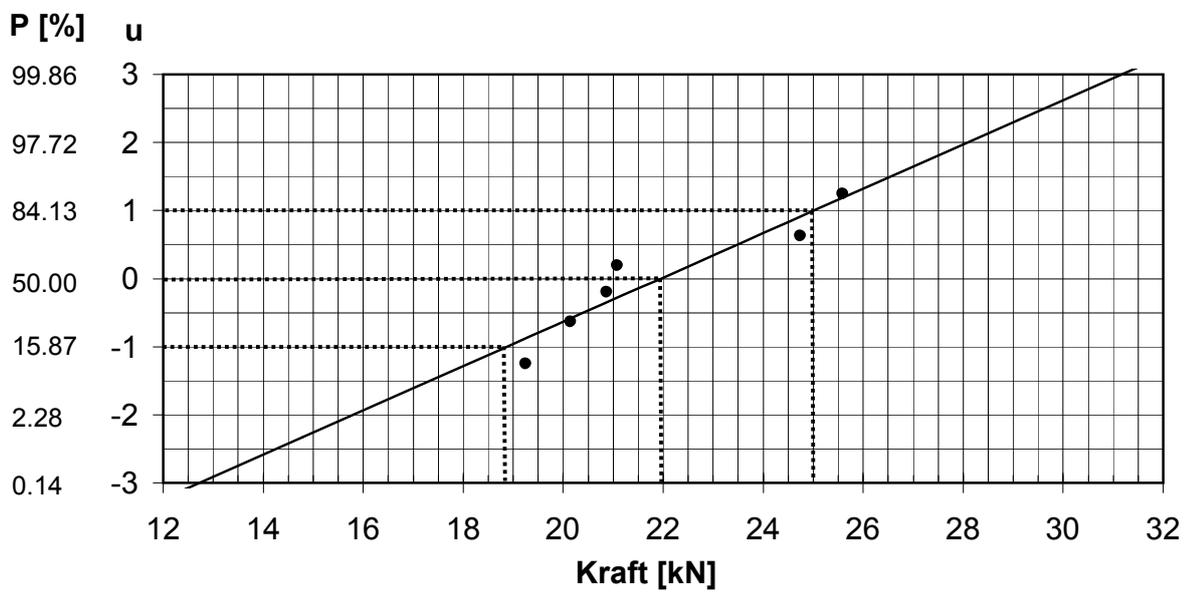


Abb. A.19: Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie D

### Versuchsdaten Serie E

Die folgenden Diagramme und Abbildungen dokumentieren die Versuche an bauteilähnlichen Proben der Serie E aus sechs Einzelproben. An zwei Proben wurde zusätzlich die Verformung senkrecht zur Krafrichtung aufgezeichnet. Der zusätzliche Wegaufnehmer befindet sich mittig auf der Rückseite der Probe etwa 5 cm vom freien Rand entfernt.



**Abb. A.20:** li: Versuchsanordnung Serie E mit horizontalem Wegaufnehmer, re: Bruchdetail E6



**Abb. A.21:** Versagensentwicklung E1



Abb. A.22: Versagensentwicklung E4

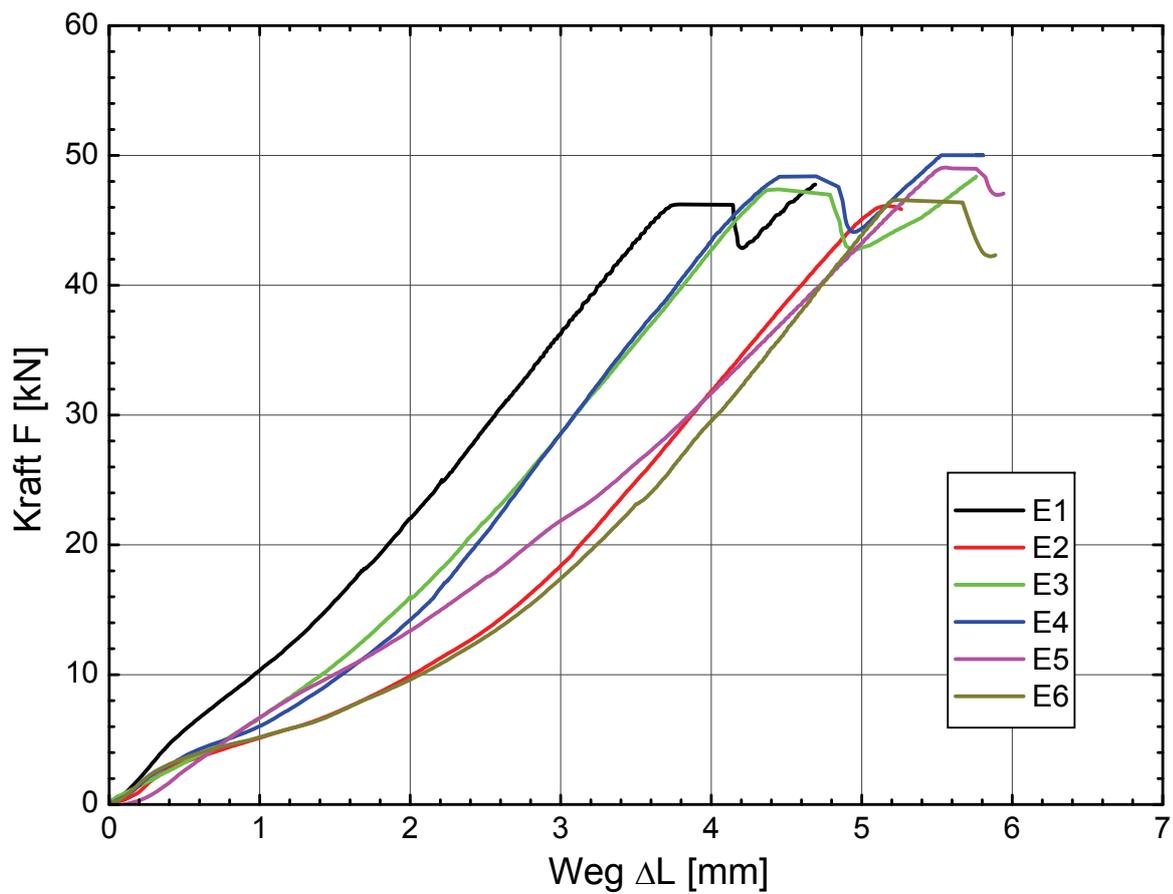


Abb. A.23: Serie E: Kraft - Weg - Diagramm, Wegmessung an GFK-Platte oberhalb Klemmlager

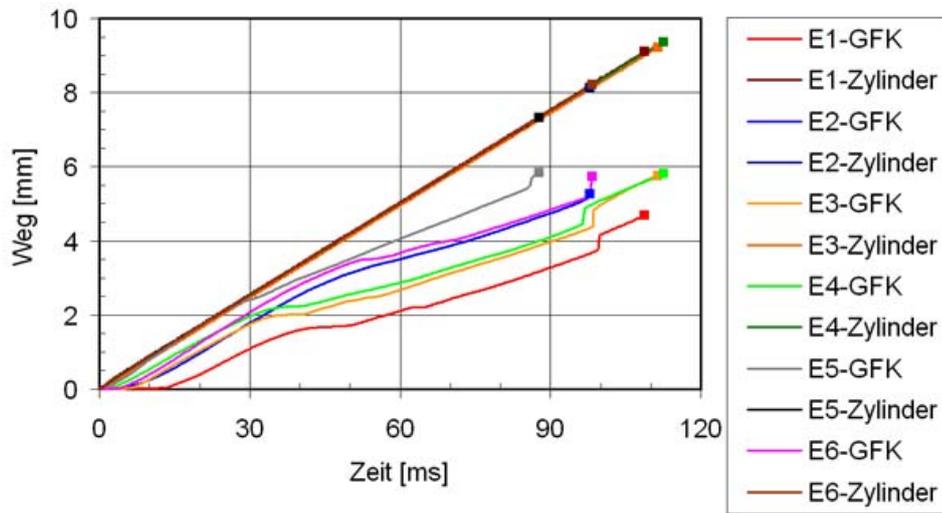


Abb. A.24: Serie E: vertikaler Weg - Zeit - Diagramm

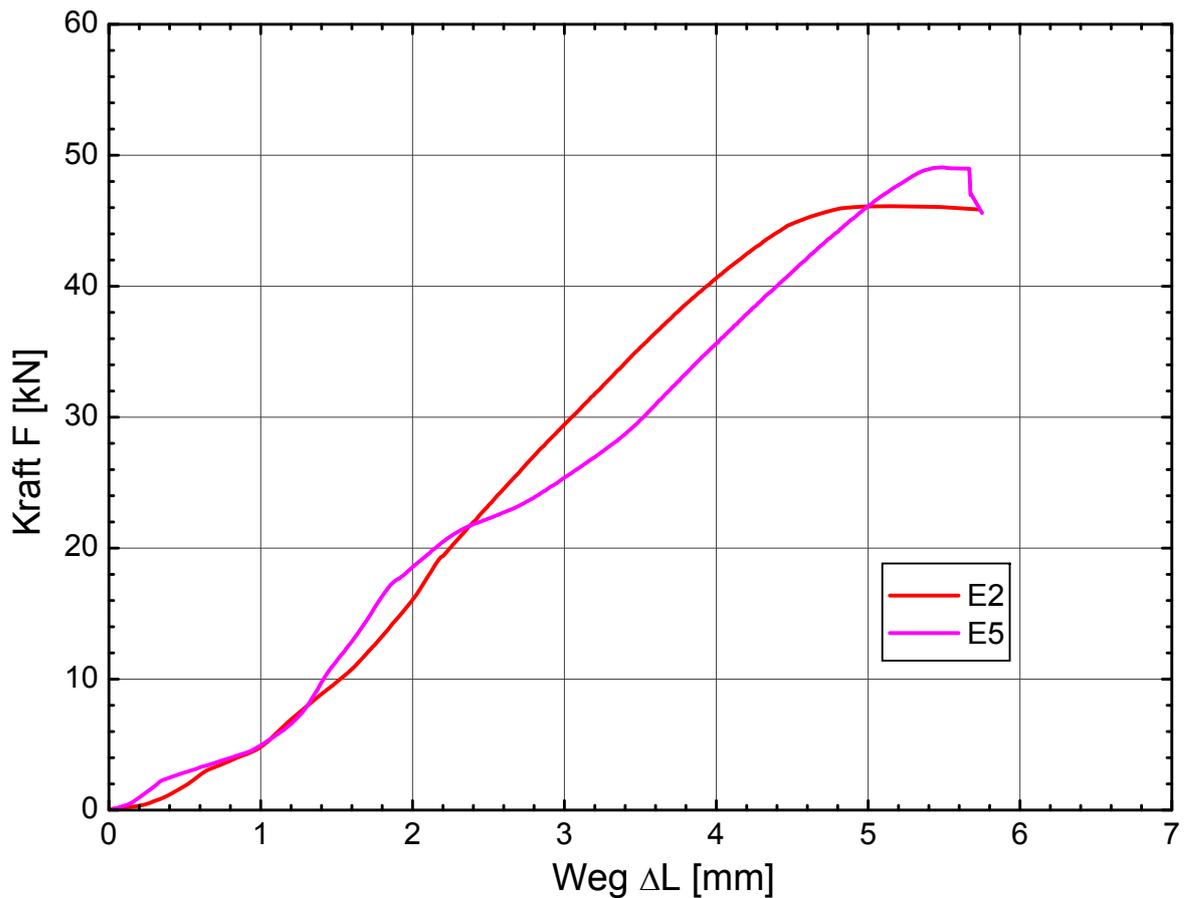


Abb. A.25: Serie E: Kraft - Weg - Diagramm der Verformung der GFK-Platte senkrecht zur Krafrichtung

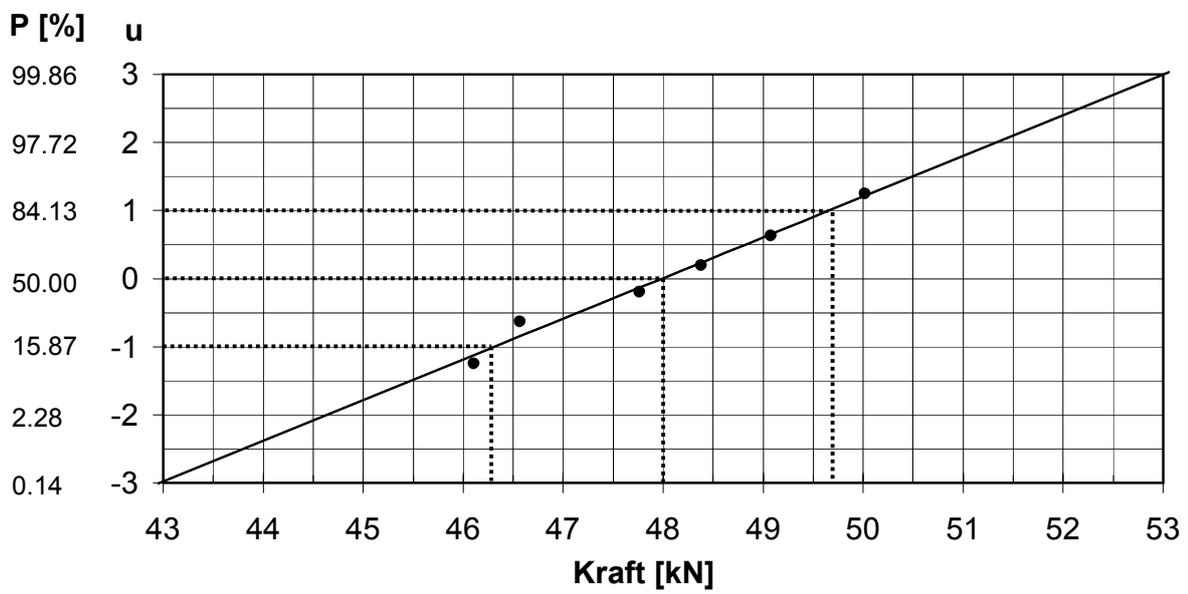


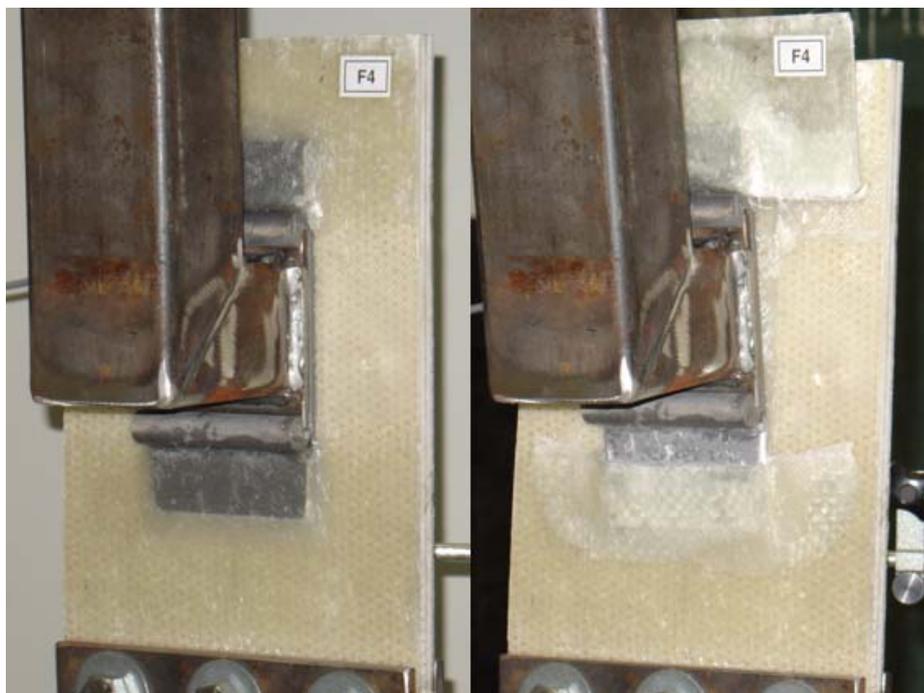
Abb. A.26: Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie E

### Versuchsdaten Serie F

Die folgenden Diagramme und Abbildungen dokumentieren die Versuche an bauteilähnlichen Proben der Serie F aus fünf Einzelproben.



**Abb. A.27:** Versagensentwicklung F2



**Abb. A.28:** Versagensentwicklung F4



**Abb. A.29:** Bruchbild F1



**Abb. A.30:** Bruchbild F3

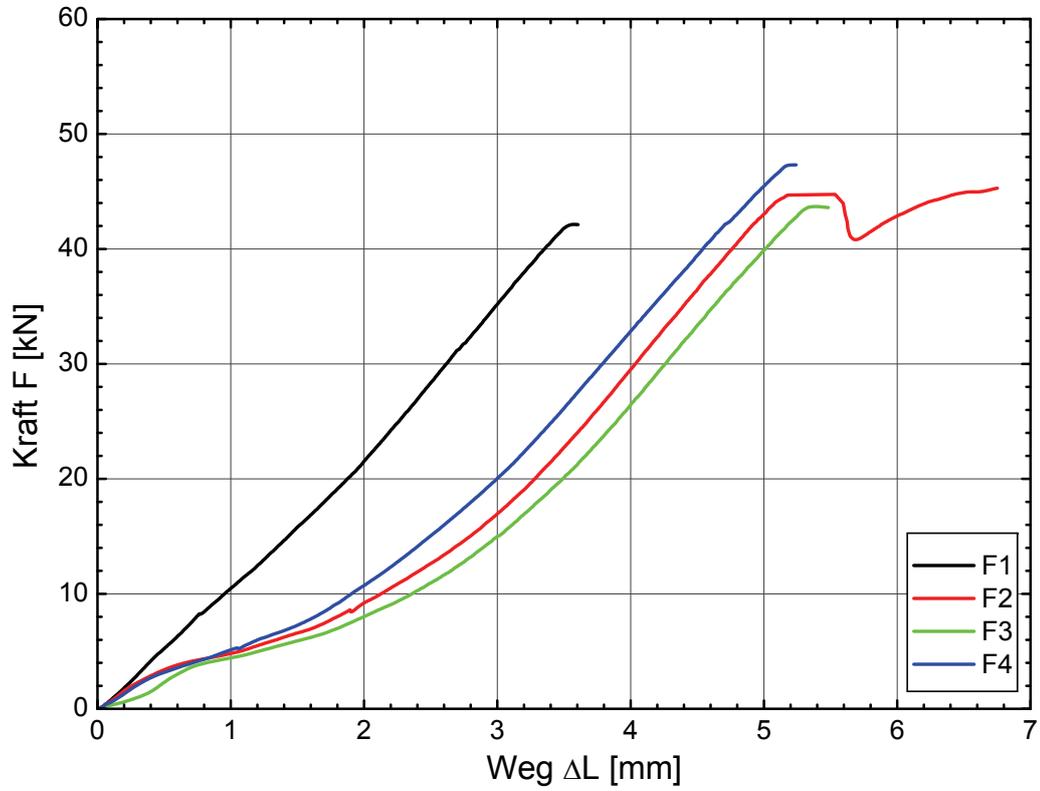


Abb. A.31: Serie F: Kraft - Weg - Diagramm

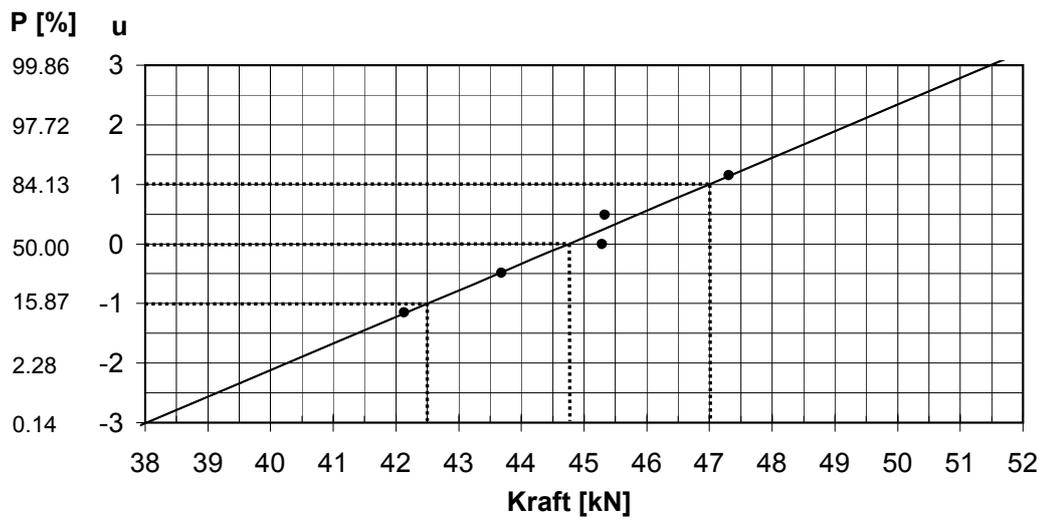


Abb. A.32: Wahrscheinlichkeitsnetz für Serie F

## **B Mechanische Kennwerte aus Hersteller- bzw. Literaturangaben**

Nachstehend werden die mechanischen Kennwerte der Klebstoffe aus Herstellerangaben zusammengestellt, soweit sie im Kap. 4.4 nicht angeführt sind. Die Angaben entsprechen Mittelwerten bzw. maximalen und minimalen Versuchsergebnissen.

### **Die mechanischen Eigenschaften von Sikadur-31 CF Normal [7]:**

- E-Modul (DIN ISO 527) 5000 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung (DIN ISO 75) 0,4 ± 0,1 %
- Haftzugfestigkeit (DIN EN 1542 u. 12188) auf Stahl 11 - 15 N/mm<sup>2</sup>
- Zugfestigkeit (DIN EN 196-1) 18 - 24 N/mm<sup>2</sup>
- Biegezugfestigkeit (DIN EN 196-1) 30 - 40 N/mm<sup>2</sup>
- Dichte 1900 kg/m<sup>3</sup>
- Wärmeausdehnungskoeffizient (DIN EN 1770)  $\alpha_t = 59 \times 10^{-6}/K$

### **Die mechanischen Eigenschaften von Sikabond-T14 [5]:**

- Dichte (DIN 53479) 1400 kg/m<sup>3</sup>
- Zugscherfestigkeit (DIN 52283) 2,2 N/mm<sup>2</sup> bei 3 mm Klebstoffdicke
- Zugfestigkeit (DIN 53504) 3,2 N/mm<sup>2</sup>
- Dauerstandsfestigkeit für die Berechnung 0,15 N/mm<sup>2</sup>
- Bruchdehnung (DIN 53504) 400 %

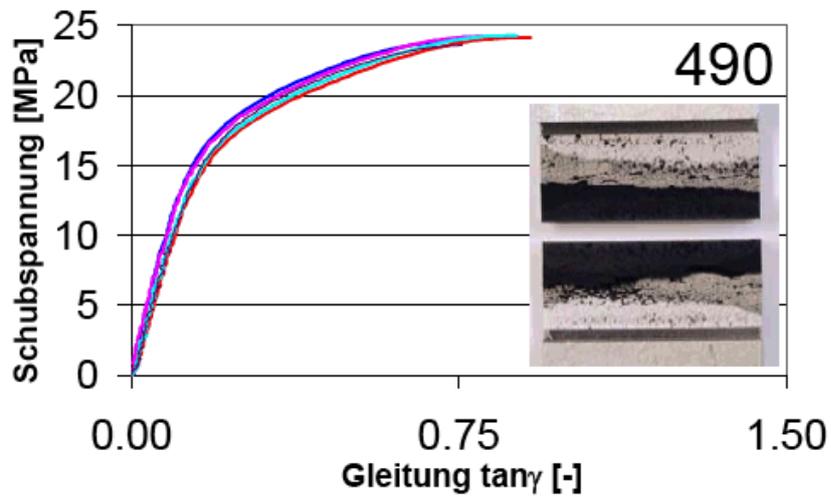
### **Die mechanischen Eigenschaften von UHU plus multifest [4]:**

- Dichte 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Zugscherfestigkeit (ASTM D 3039) 20 - 24 N/mm<sup>2</sup>

**Materialkenngrößen für GF-UP-Laminat allg. nach DIN 18820-2 [86]:**

- interlaminare Scherfestigkeit 8 N/mm<sup>2</sup>
- interlaminare Zugfestigkeit 4 N/mm<sup>2</sup>
- Querdehnzahl  $\nu = 0,3$

**Schubspannungs-Gleitungsverhalten für den DP490:**

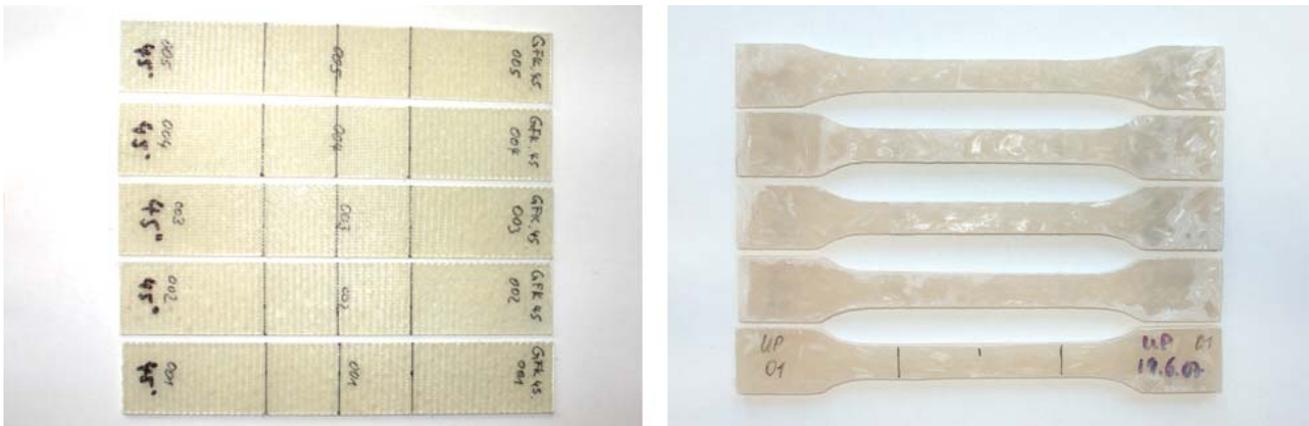


**Abb. B.1:** Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm mit Bruchflächendetail des DP490 ermittelt an der dicken überlappten Zugscherprobe nach DIN 14689-2:2004 [84, 94]

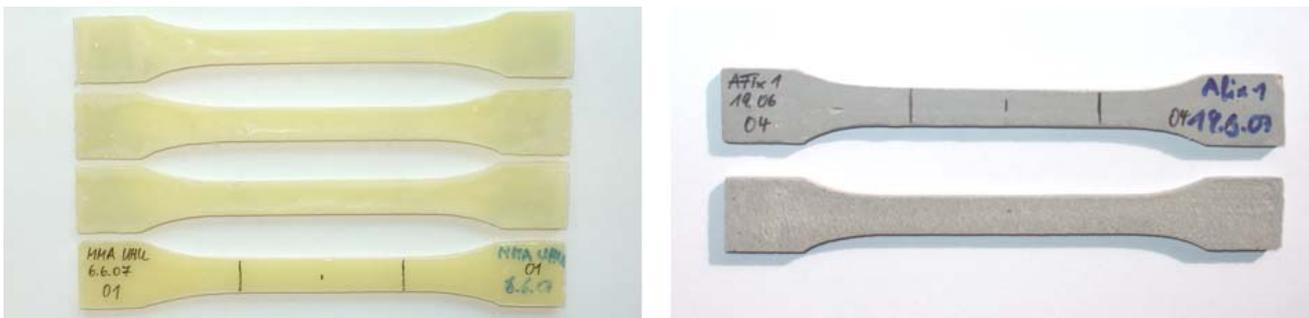
## C Abbildungen zu den Zugversuchen an Substanzproben



**Abb. C.1:** Streifenproben Edelstahl 1.4301 (links) und GFK 0°-Ausrichtung (rechts)



**Abb. C.2:** Streifenprobe GFK.45° (links) und Schulterstab UP (rechts)



**Abb. C.3:** Schulterstäbe MA (links) und Anchorfix1 (rechts)

C Abbildungen zu den Zugversuchen an Substanzproben

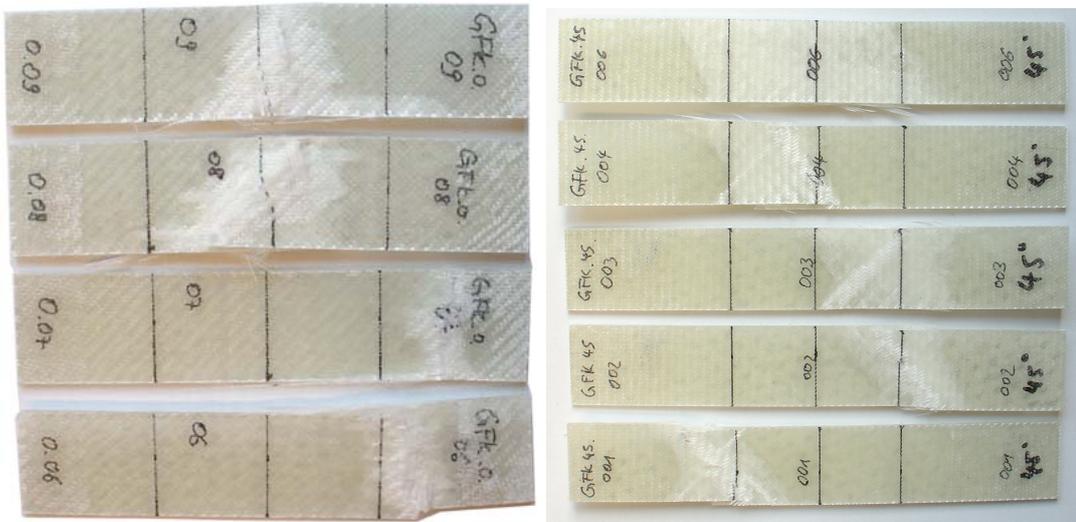


Abb. C.4: Bruchbilder der unter 0° (links) und 45° ausgerichteten GFK-Substanzproben (rechts)



Abb. C.5: Bruchbilder PUR (links) und gefülltes UP-Harz (rechts)

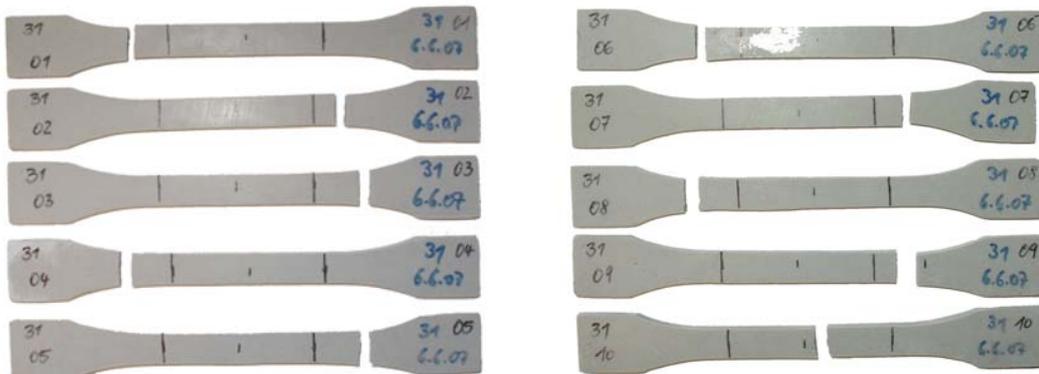


Abb. C.6: Bruchbilder der SI31-Schulterstäbe

Anhang



Abb. C.7: Bruchbilder der SI30-Schulterstäbe

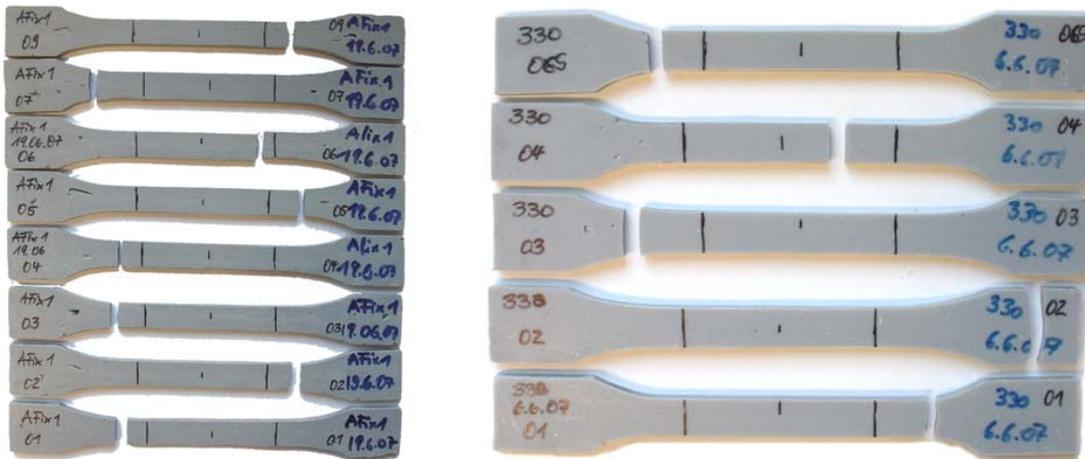


Abb. C.8: Bruchbilder Anchorfix1 (links) und SI330 (rechts)

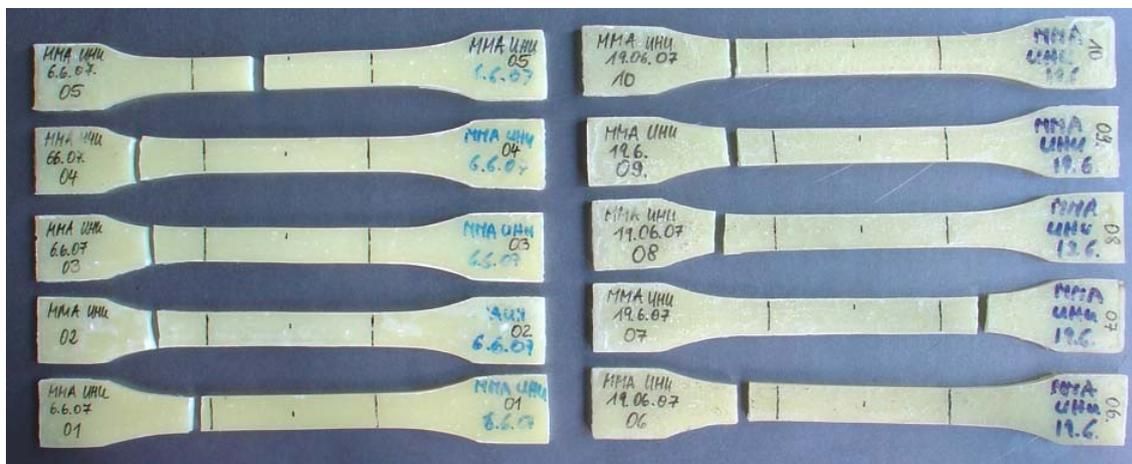
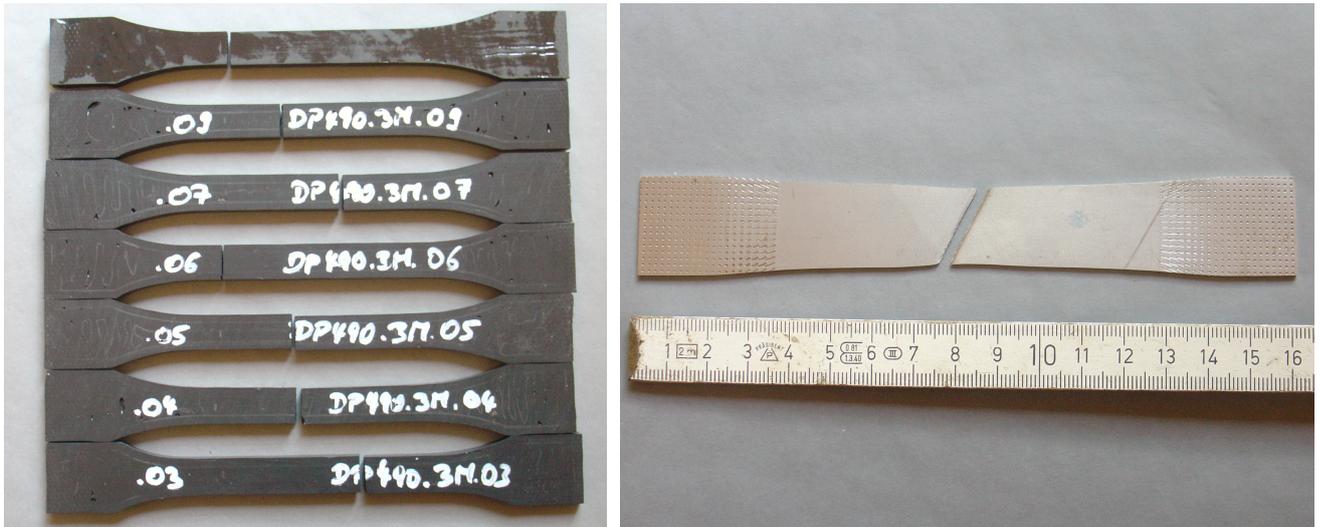
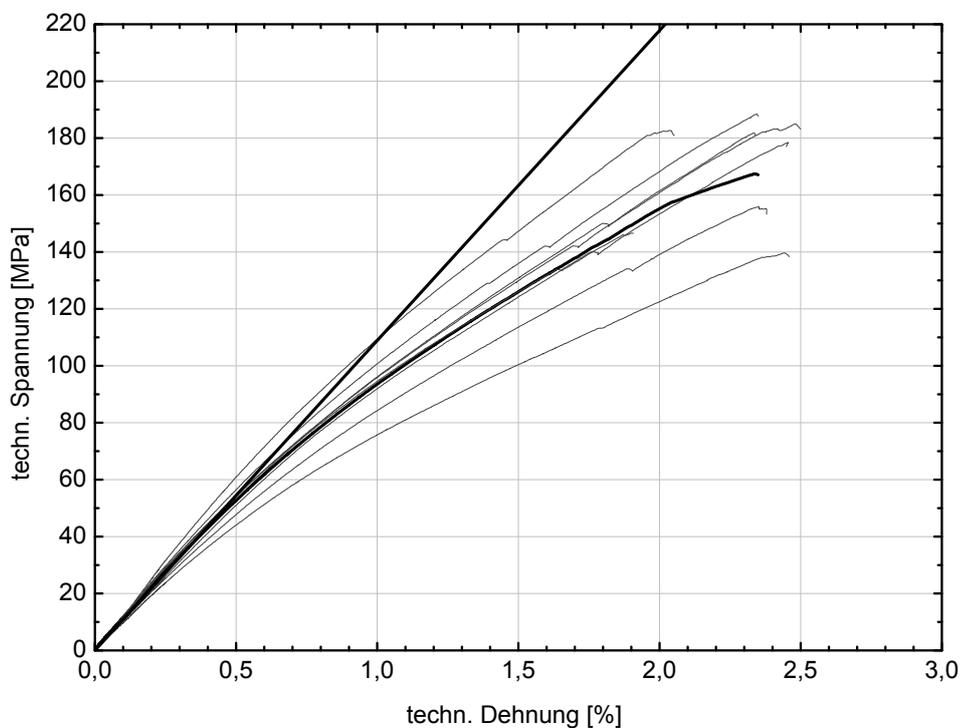


Abb. C.9: Bruchbilder aus Zugversuchen an MA-Substanzproben

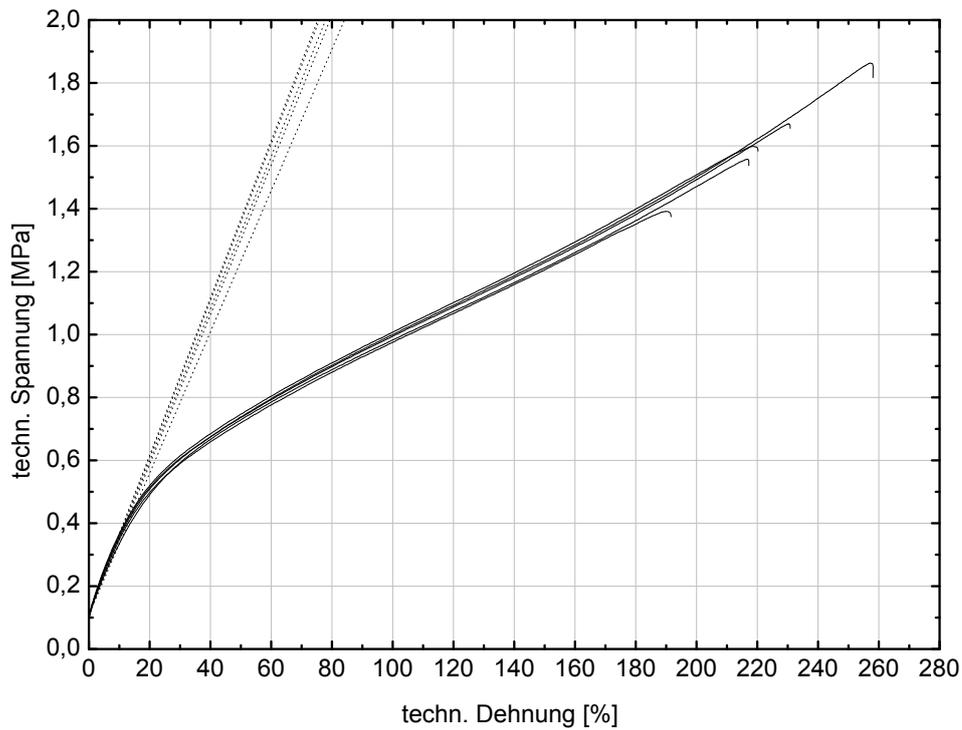


**Abb. C.10:** Bruchbilder aus Zugversuchen an DP490-Substanzproben (links) und einer repräsentativen 1.4301-Streifenprobe (rechts)

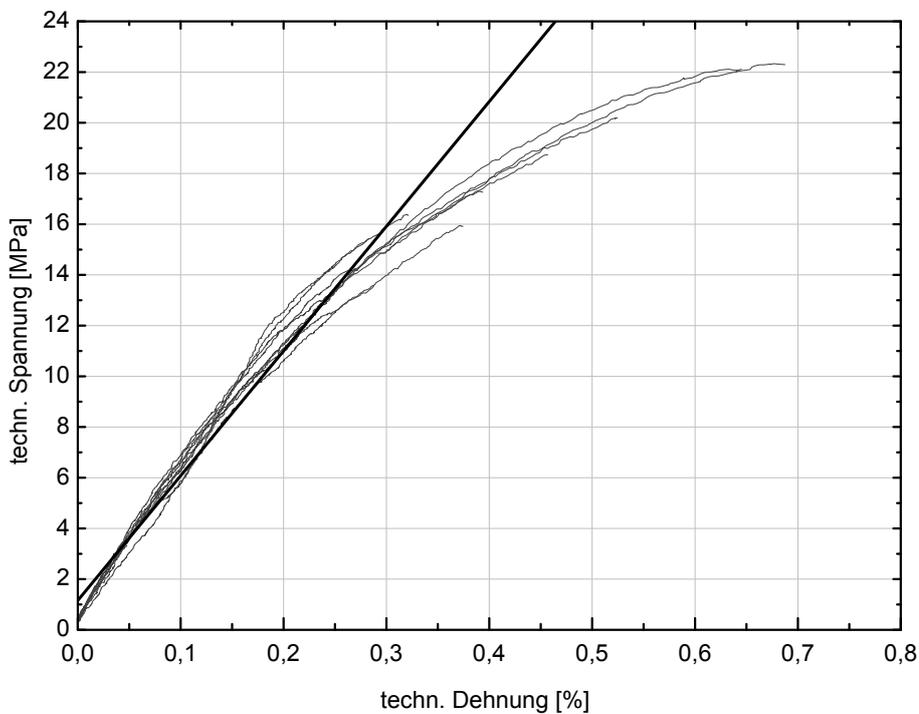
**Ergänzende Spannungs-Dehnungs-Diagramme zu den Zugversuchen aus Kapitel 4.4:**



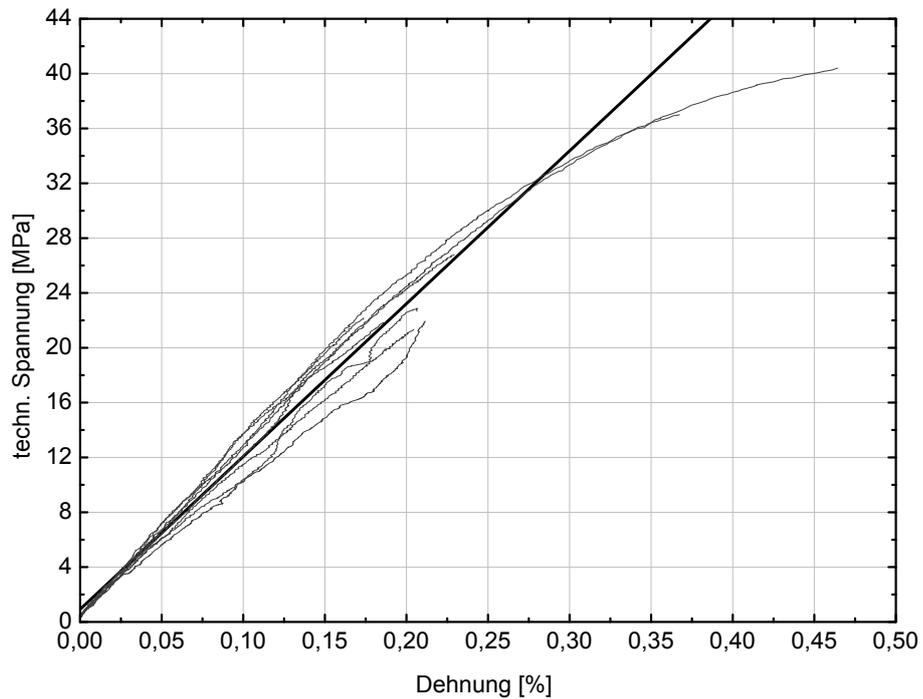
**Abb. C.11:**  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm aus Zugversuchen der GFK.45-Streifenproben mit  $v = 0,5$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und  $0,25$  %, ( $n = 8$ )



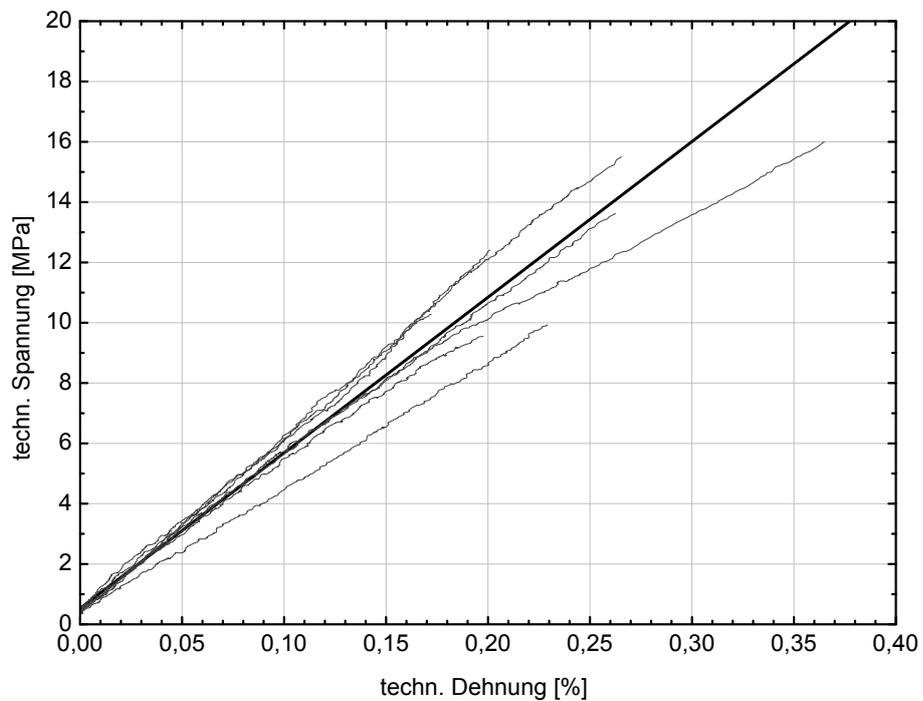
**Abb. C.12:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen der PUR-Schulterstäbe mit  $v = 200$  mm/min, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 1$  und 10 %, ( $n = 5$ )



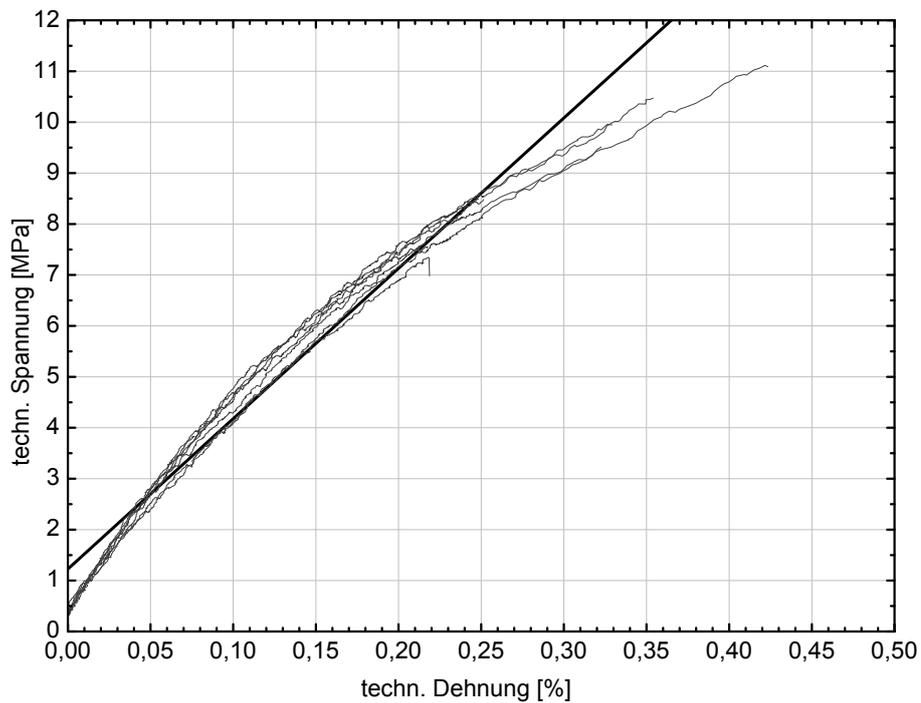
**Abb. C.13:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen der SI31-Schulterstäbe mit  $v = 0,5$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und 0,25 %, ( $n = 9$ )



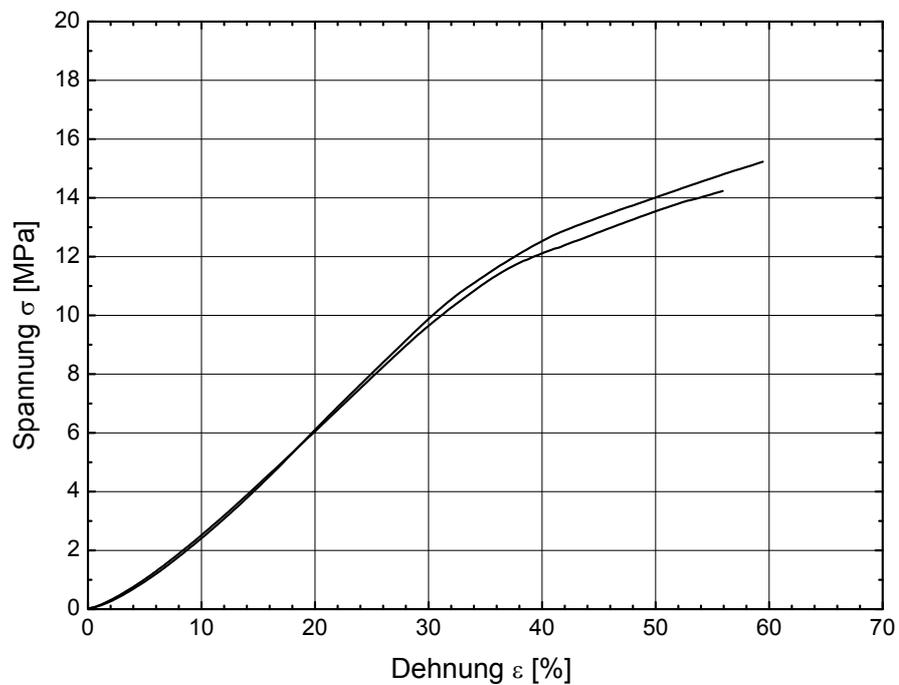
**Abb. C.14:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen der SI30-Schulterstäbe mit  $v = 0,5$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und  $0,25$  % ( $n = 2$ ),  $\varepsilon = 0,20$  % ( $n = 1$ ),  $0,16$  % ( $n = 5$ )



**Abb. C.15:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen der UP-Schulterstäbe mit  $v = 0,5$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und  $0,16$  %, ( $n = 7$ )



**Abb. C.16:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm aus Zugversuchen der Anchorfix1-Streifenproben mit  $v = 0,5$  mm/min bezogen auf  $L_0 = 50$  mm, E-Modul als Sekante zwischen  $\varepsilon = 0,05$  und  $0,25$  % ( $n = 6$ ),  $0,16$  % ( $n = 2$ )



**Abb. C.17:**  $\sigma$  -  $\varepsilon$  - Diagramm der Interlaminaren Zugversuche mit  $v = 1,0$  mm/min (Traversenweg) bezogen auf  $L_0 = 2,5$  mm, Mittelwert der Sirnzugfestigkeit  $\sigma = 14,7$  MPa

## D Materialkennwerte für die FEM-Berechnungen

Die Beschreibungen der Materialkennwerte werden als Auszüge aus den ANSYS®-Makros angegeben. Die Raumrichtungen werden wie folgt verwendet:

x-Richtung entspricht der Modelllängsrichtung

y-Richtung entspricht der Dickenrichtung

z-Richtung entspricht der Tiefenrichtung

### GFK:

mp,ex,1,11920	<i>! E-Modul x</i>
mp,ey,1,4000	<i>! E-Modul y</i>
mp,ez,1,11920	<i>! E-Modul z</i>
mp,nuxy,1,0.3	<i>! Querdehnzahl xy</i>
mp,nuxz,1,0.3	<i>! Querdehnzahl xz</i>
mp,nuyz,1,0.3	<i>! Querdehnzahl yz</i>
mp,gxy,1,2500	<i>! Schubmodul xy</i>
mp,gxz,1,9300	<i>! Schubmodul xz</i>
mp,gyz,1,2500	<i>! Schubmodul yz</i>

### Edelstahl 1.4301:

mp,ex,2,140044	<i>! E-Modul x</i>
mp,nuxy,2,0.30	<i>! Querdehnzahl xy</i>
TB,MISO,2,1,66,	<i>! NL Materialkurve (Multilinear isotrope Verfestigung)</i>
TBTEMP,0,	
TBPT,DEFI, 0.000713041, 99.8571	<i>! Dehnungs-Spannungswertepaare</i>
TBPT,DEFI, 0.000803941, 112.5871	
TBPT,DEFI, 0.000855341, 119.2582	
TBPT,DEFI, 0.000925341, 126.7624	
TBPT,DEFI, 0.001014741, 137.0795	
TBPT,DEFI, 0.001145341, 149.7521	

## Anhang

TBPT,DEFI, 0.001299441, 166.0449	TBPT,DEFI, 0.007946441, 333.8775
TBPT,DEFI, 0.001355341, 171.9400	TBPT,DEFI, 0.008539541, 336.3438
TBPT,DEFI, 0.001465341, 182.7453	TBPT,DEFI, 0.007946441, 333.8775
TBPT,DEFI, 0.001586041, 193.9639	TBPT,DEFI, 0.009132241, 338.8006
TBPT,DEFI, 0.001722741, 205.0603	TBPT,DEFI, 0.009996941, 342.0167
TBPT,DEFI, 0.001860541, 217.7919	TBPT,DEFI, 0.011135841, 346.3116
TBPT,DEFI, 0.001952341, 225.7097	TBPT,DEFI, 0.011999741, 349.5383
TBPT,DEFI, 0.002090041, 236.9007	TBPT,DEFI, 0.013178741, 353.6069
TBPT,DEFI, 0.002181841, 243.8880	TBPT,DEFI, 0.016306241, 364.2169
TBPT,DEFI, 0.002411341, 259.0510	TBPT,DEFI, 0.018836341, 372.1790
TBPT,DEFI, 0.002594841, 269.8794	TBPT,DEFI, 0.021495141, 380.3780
TBPT,DEFI, 0.002732441, 277.2018	TBPT,DEFI, 0.023832441, 387.1883
TBPT,DEFI, 0.002824241, 281.0418	TBPT,DEFI, 0.027776241, 398.1950
TBPT,DEFI, 0.002961841, 286.3943	TBPT,DEFI, 0.031526341, 408.5679
TBPT,DEFI, 0.003145241, 291.9030	TBPT,DEFI, 0.035129141, 417.9854
TBPT,DEFI, 0.003374541, 298.0765	TBPT,DEFI, 0.039382641, 428.9194
TBPT,DEFI, 0.003545341, 301.3782	TBPT,DEFI, 0.044850241, 442.6503
TBPT,DEFI, 0.003695341, 303.7664	TBPT,DEFI, 0.053518041, 463.1625
TBPT,DEFI, 0.003955341, 307.5916	TBPT,DEFI, 0.061204041, 480.9111
TBPT,DEFI, 0.004185341, 310.6147	TBPT,DEFI, 0.070159841, 500.8350
TBPT,DEFI, 0.004465341, 313.7034	TBPT,DEFI, 0.075675541, 512.5892
TBPT,DEFI, 0.004792641, 316.4191	TBPT,DEFI, 0.082642441, 527.5051
TBPT,DEFI, 0.005022541, 318.3333	TBPT,DEFI, 0.092501741, 547.9448
TBPT,DEFI, 0.005433341, 321.0243	TBPT,DEFI, 0.100435141, 564.1948
TBPT,DEFI, 0.005753541, 322.9835	TBPT,DEFI, 0.106572641, 576.2929
TBPT,DEFI, 0.005982241, 324.1639	TBPT,DEFI, 0.116934241, 597.0605
TBPT,DEFI, 0.006348941, 326.1955	TBPT,DEFI, 0.127758141, 618.4873
TBPT,DEFI, 0.006622141, 327.6637	TBPT,DEFI, 0.137424341, 637.5250
TBPT,DEFI, 0.006850641, 328.7394	TBPT,DEFI, 0.145487941, 653.3691
TBPT,DEFI, 0.007308341, 330.8143	TBPT,DEFI, 0.195959241, 753.3713
	TBPT,DEFI, 0.215129841, 791.4008



## Anhang

TBPT,DEFI,0.017183281,24.05915137	TBPT,DEFI,0.029144177,31.5406151
TBPT,DEFI,0.017598109,24.42628951	TBPT,DEFI,0.029554074,31.70021552
TBPT,DEFI,0.018012765,24.79409044	TBPT,DEFI,0.029572,31.7045399
TBPT,DEFI,0.018427348,25.21529941	TBPT,DEFI,0.029822101,31.76489313
TBPT,DEFI,0.018841661,25.5599217	TBPT,DEFI,0.0299639,31.79912483
TBPT,DEFI,0.019255802,25.88697063	TBPT,DEFI,0.030373462,31.91593474
TBPT,DEFI,0.019669771,26.27896058	TBPT,DEFI,0.030782855,32.03856338
TBPT,DEFI,0.019815825,26.40251507	TBPT,DEFI,0.031192081,32.21738392
TBPT,DEFI,0.020068378,26.61628736	TBPT,DEFI,0.03160114,32.30252288
TBPT,DEFI,0.02008357,26.62914926	TBPT,DEFI,0.032010032,32.38812338
TBPT,DEFI,0.020497197,26.94424139	TBPT,DEFI,0.032418756,32.49922429
TBPT,DEFI,0.020910653,27.19699053	TBPT,DEFI,0.032827313,32.62910897
TBPT,DEFI,0.021323939,27.5489368	TBPT,DEFI,0.033235704,32.71590789
TBPT,DEFI,0.021737053,27.79176365	TBPT,DEFI,0.033643928,32.77967307
TBPT,DEFI,0.022149997,28.05901217	TBPT,DEFI,0.034051985,32.82921192
TBPT,DEFI,0.022562771,28.30841937	TBPT,DEFI,0.034459876,32.93868878
TBPT,DEFI,0.022975374,28.56212601	TBPT,DEFI,0.0348676,33.02200523
TBPT,DEFI,0.023387807,28.82939095	TBPT,DEFI,0.035275159,33.098635
TBPT,DEFI,0.02380007,29.08705598	TBPT,DEFI,0.035682647,33.12779413
TBPT,DEFI,0.024212261,29.32391411	TBPT,DEFI,0.036089874,33.19023166
TBPT,DEFI,0.024624184,29.54959861	TBPT,DEFI,0.036496934,33.26332954
TBPT,DEFI,0.025035938,29.76399578	TBPT,DEFI,0.036903829,33.30495425
TBPT,DEFI,0.025447522,29.97684642	TBPT,DEFI,0.037310559,33.37946495
TBPT,DEFI,0.025858937,30.19035472	TBPT,DEFI,0.037717123,33.3976492
TBPT,DEFI,0.026270182,30.37585849	TBPT,DEFI,0.038123522,33.43233407
TBPT,DEFI,0.026681259,30.56728675	TBPT,DEFI,0.038529756,33.50886664
TBPT,DEFI,0.027092167,30.75222477	TBPT,DEFI,0.038935824,33.51793286
TBPT,DEFI,0.027502906,30.90794843	TBPT,DEFI,0.039233911,33.58688528
TBPT,DEFI,0.027913476,31.05820598	TBPT,DEFI,0.039341728,33.61184774
TBPT,DEFI,0.028323878,31.24157765	TBPT,DEFI,0.039481607,33.62160531
TBPT,DEFI,0.028734111,31.41760751	TBPT,DEFI,0.039747468,33.64014928

## E Abbildungen zu den Berechnungen an Zugscherversuchen

Berechnung der DP490-Zugscherprobe mit 12 mm Überlappung, nichtlinear:

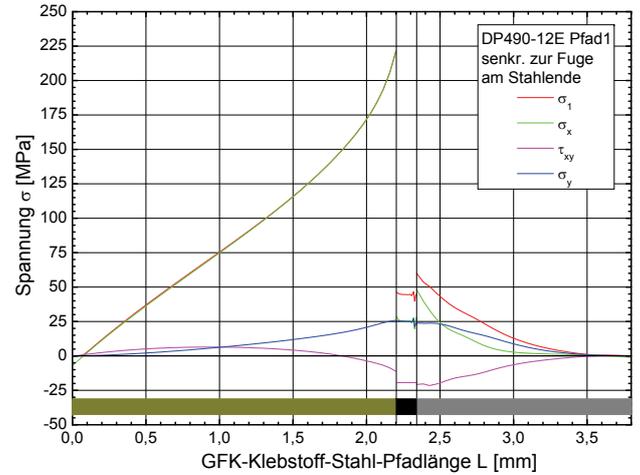
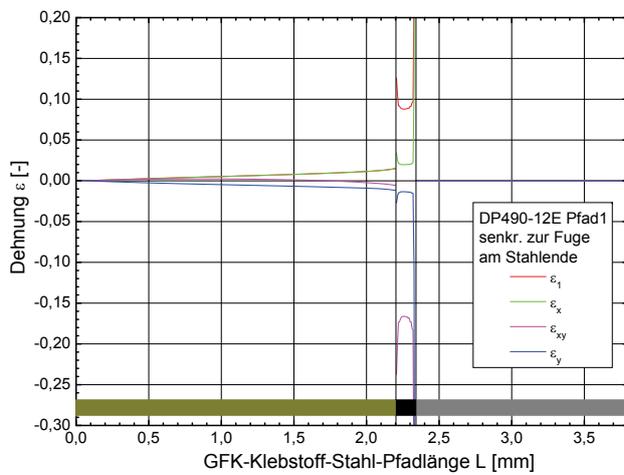


Abb. E.1: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 der Zugscherprobe DP490-12E

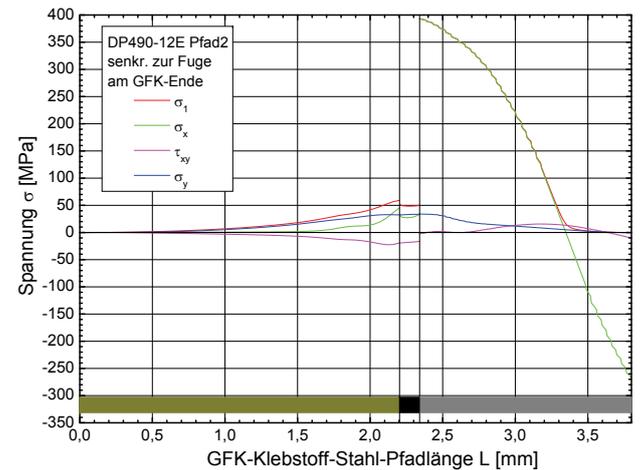
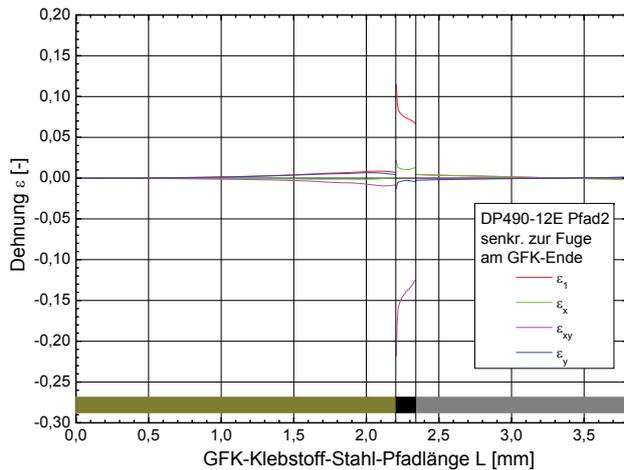
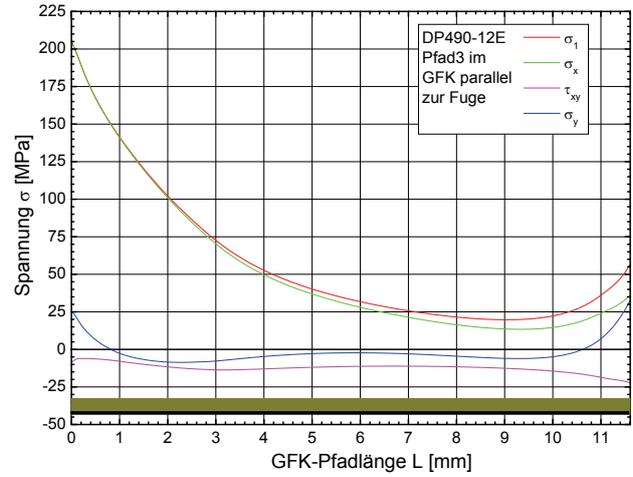
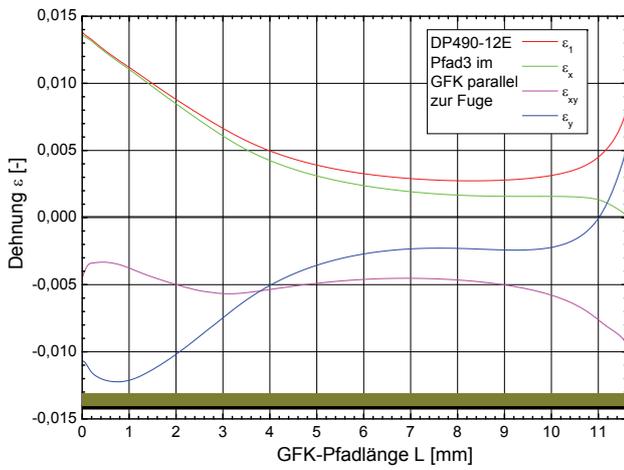
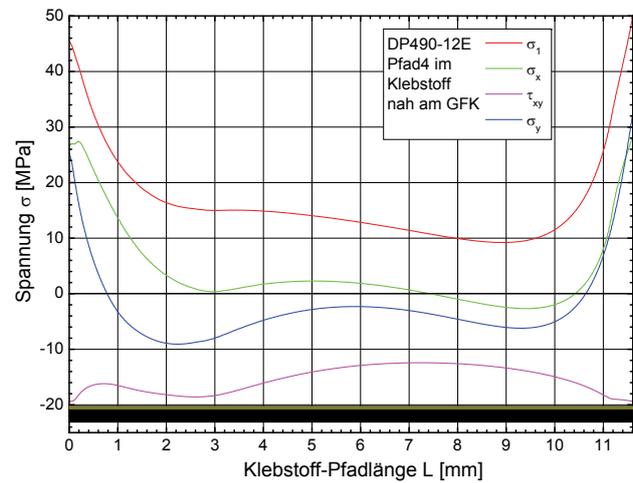
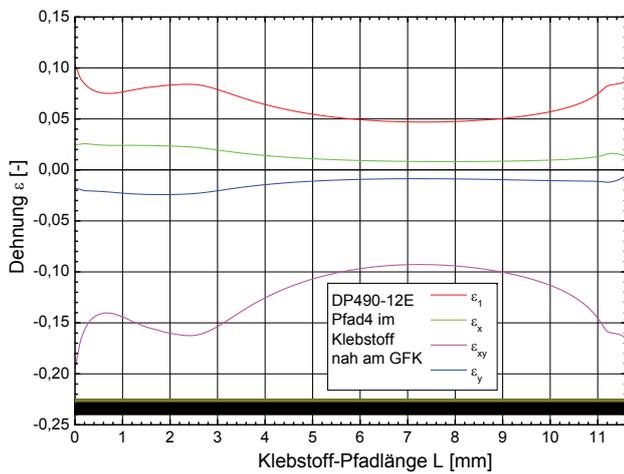


Abb. E.2: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 der Zugscherprobe DP490-12E

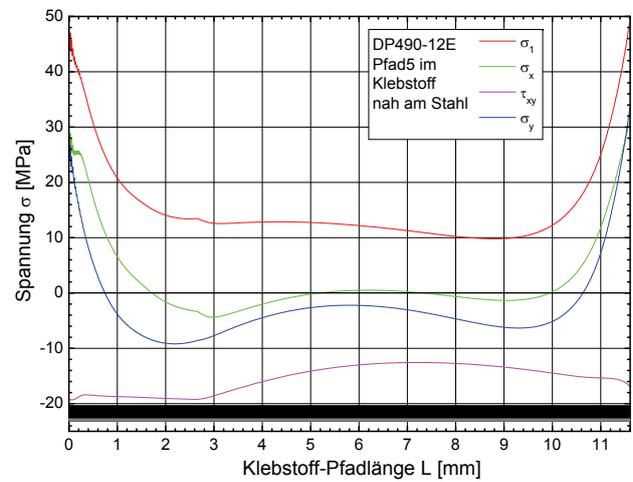
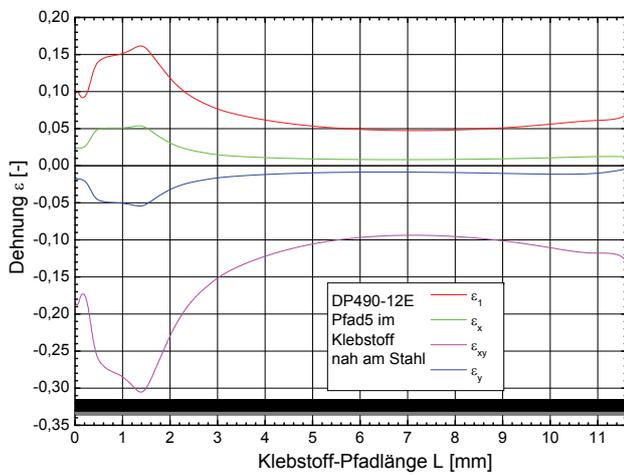
## Anhang



**Abb. E.3:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 der Zugscherprobe DP490-12E



**Abb. E.4:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 der Zugscherprobe DP490-12E



**Abb. E.5:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 der Zugscherprobe DP490-12E

E Abbildungen zu den Berechnungen an Zugscherversuchen

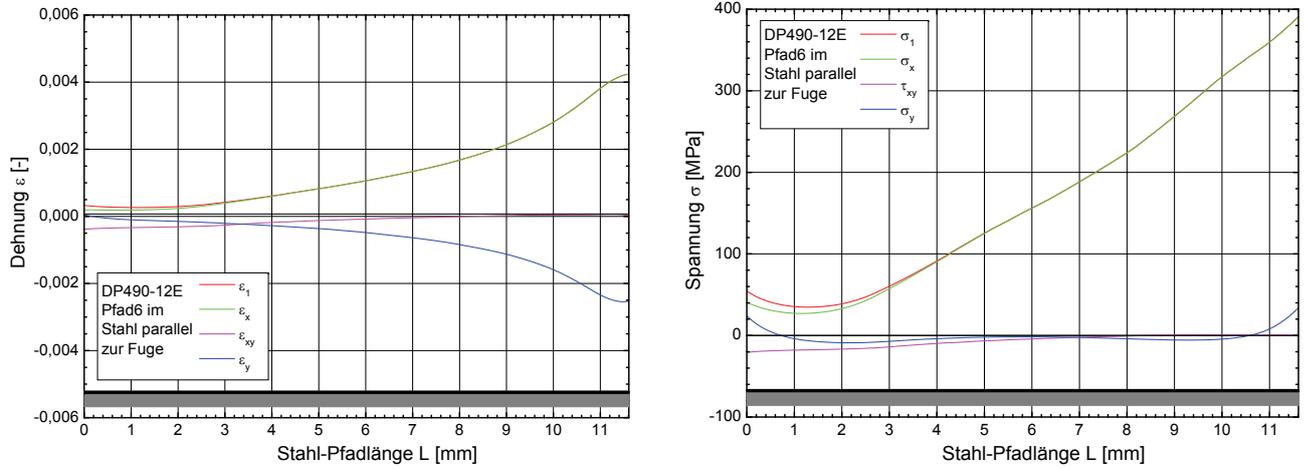


Abb. E.6: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 6 der Zugscherversuche DP490-12E

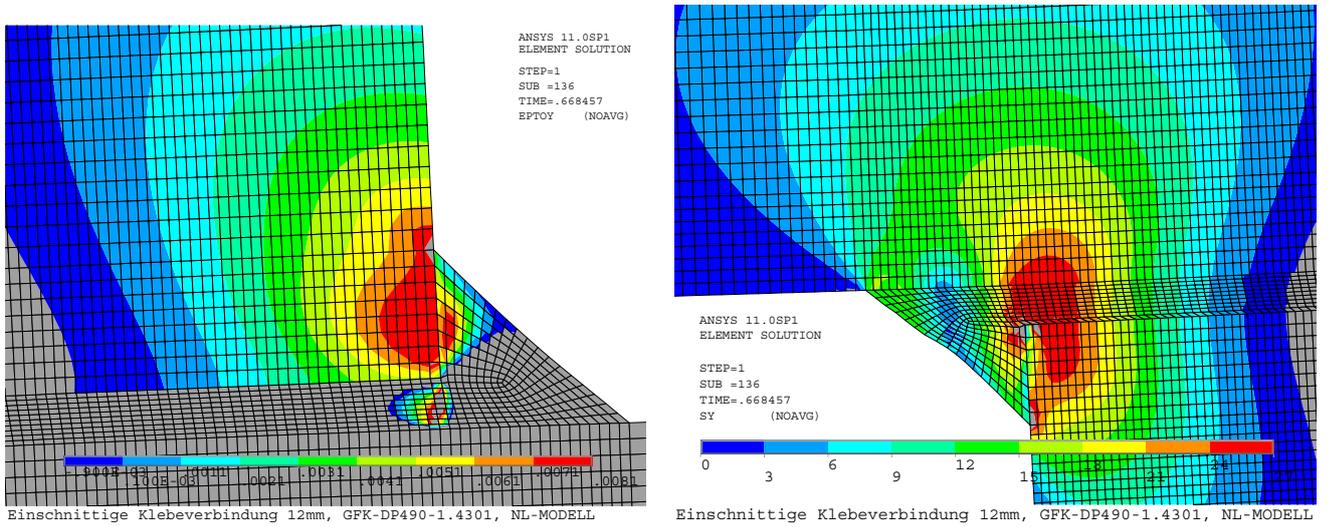


Abb. E.7: links:  $\epsilon_y$  (-0,9 E-03 bis 0,0081) im GFK, rechts:  $\sigma_y$  (0 bis 27) für DP490-12E - Ende Stahl-Fügeteil

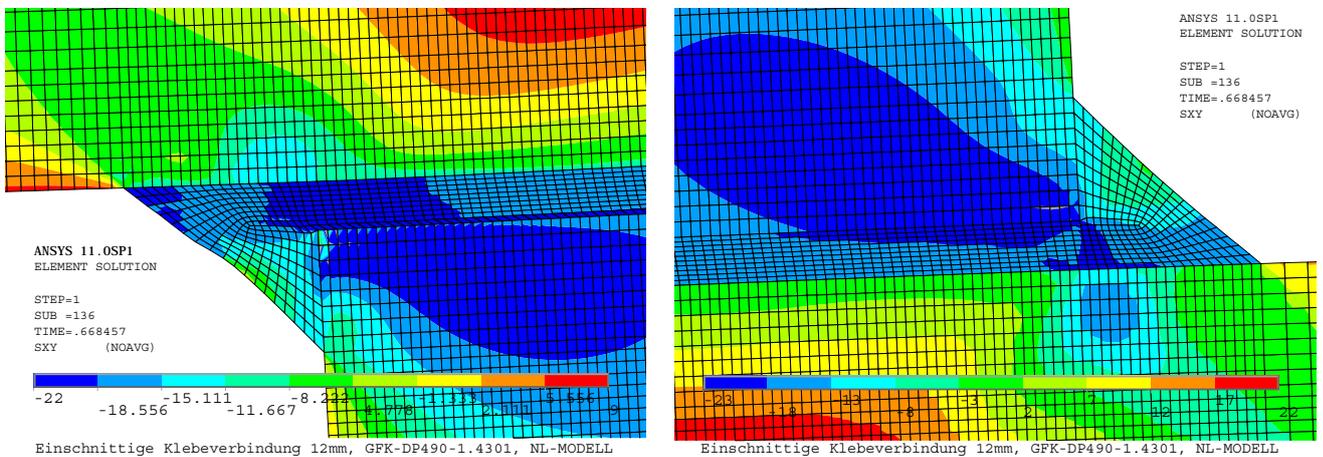
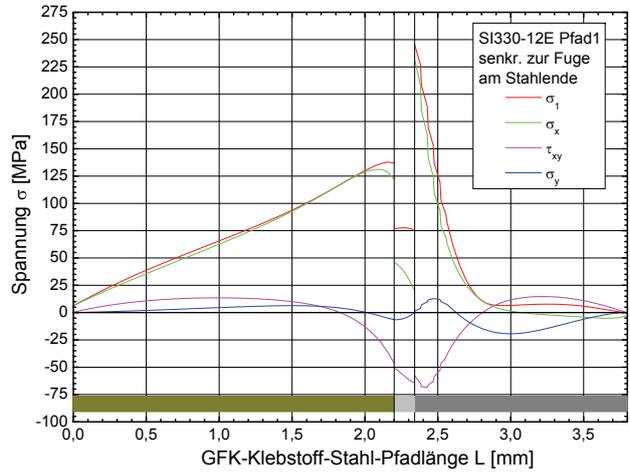
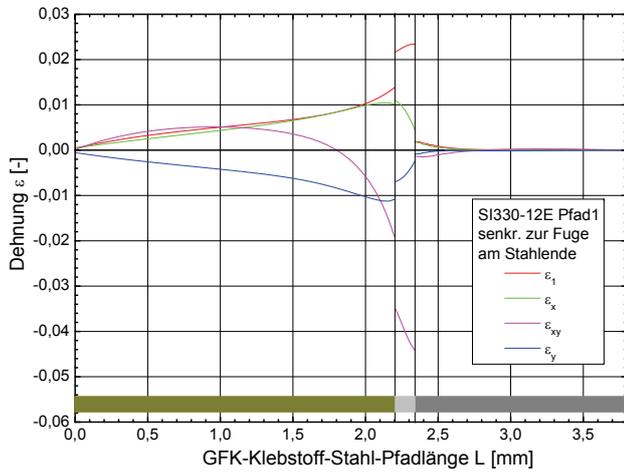
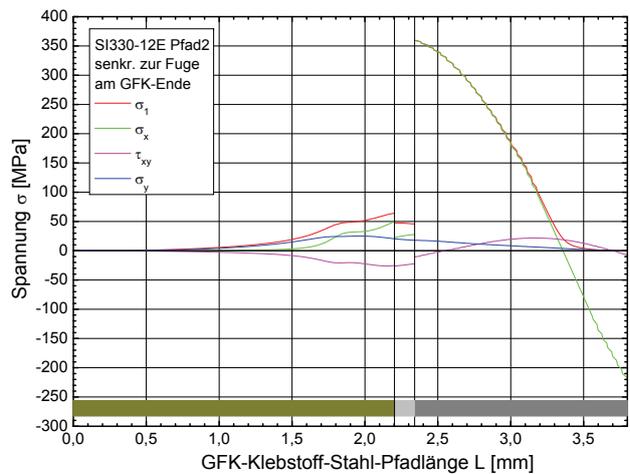
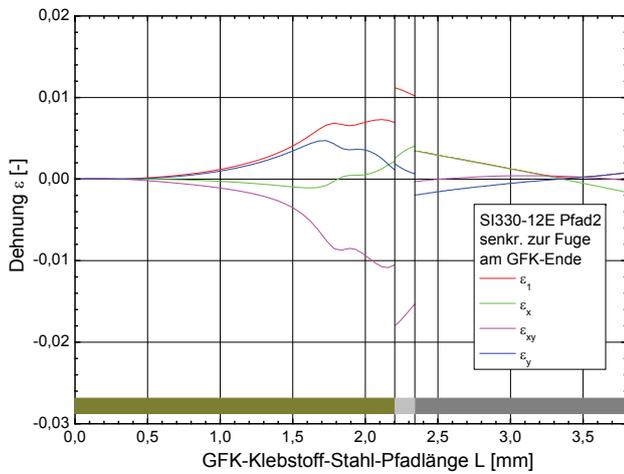


Abb. E.8: links:  $\tau_{xy}$  (-22 bis 9) Ende Stahl, rechts:  $\tau_{xy}$  (-23 bis 22) Ende GFK für DP490-12E

**Berechnung der SI330-Zugscherprobe mit 12 mm Überlappung und linearem Materialansatz für den Klebstoff:**



**Abb. E.9:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 der Zugscherprobe SI330-12E



**Abb. E.10:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 der Zugscherprobe SI330-12E

E Abbildungen zu den Berechnungen an Zugscherversuchen

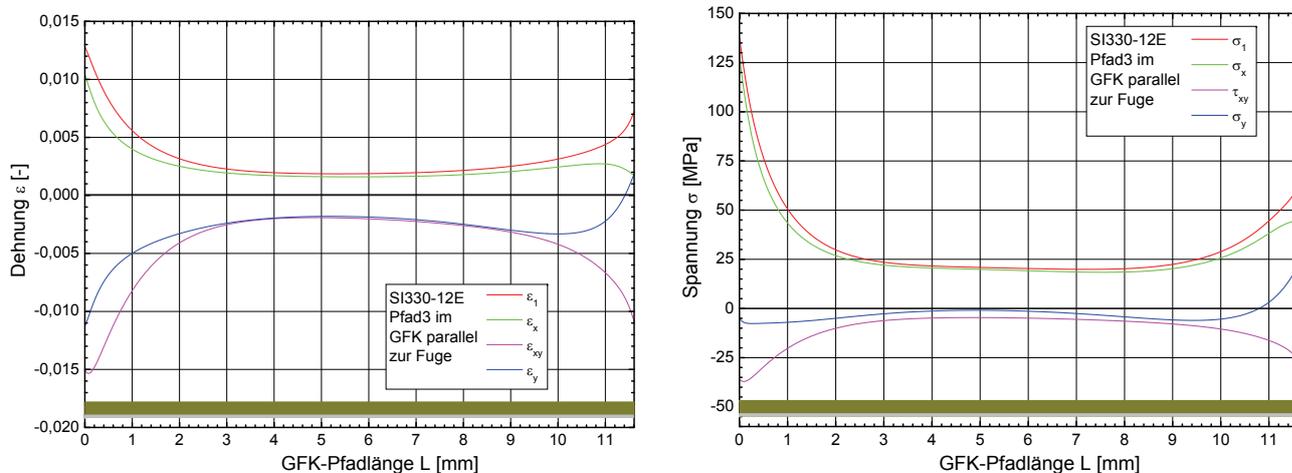


Abb. E.11: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 der Zugscherprobe SI330-12E

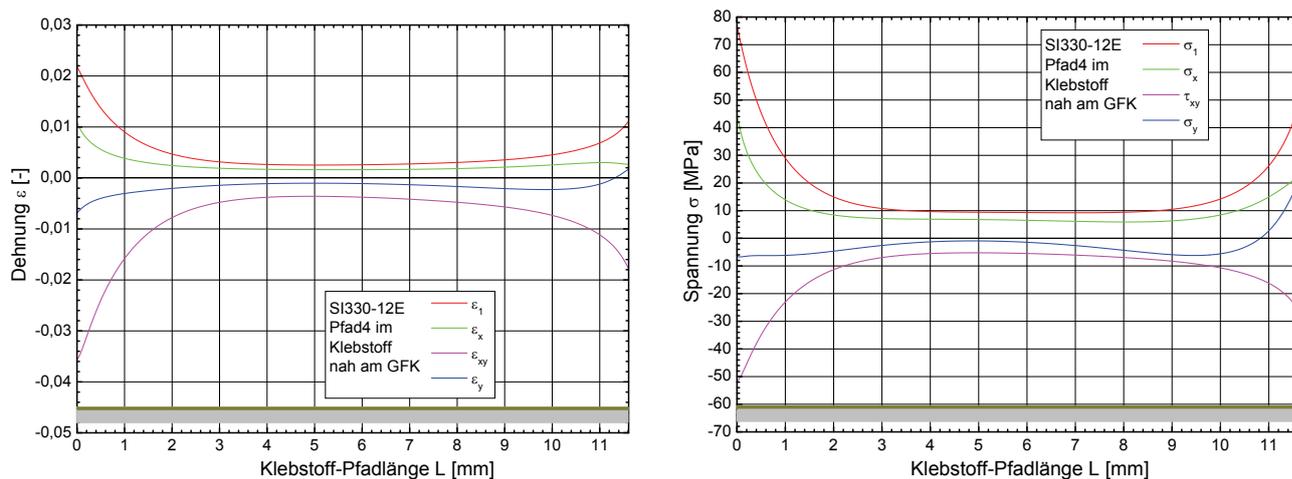


Abb. E.12: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 der Zugscherprobe SI330-12E

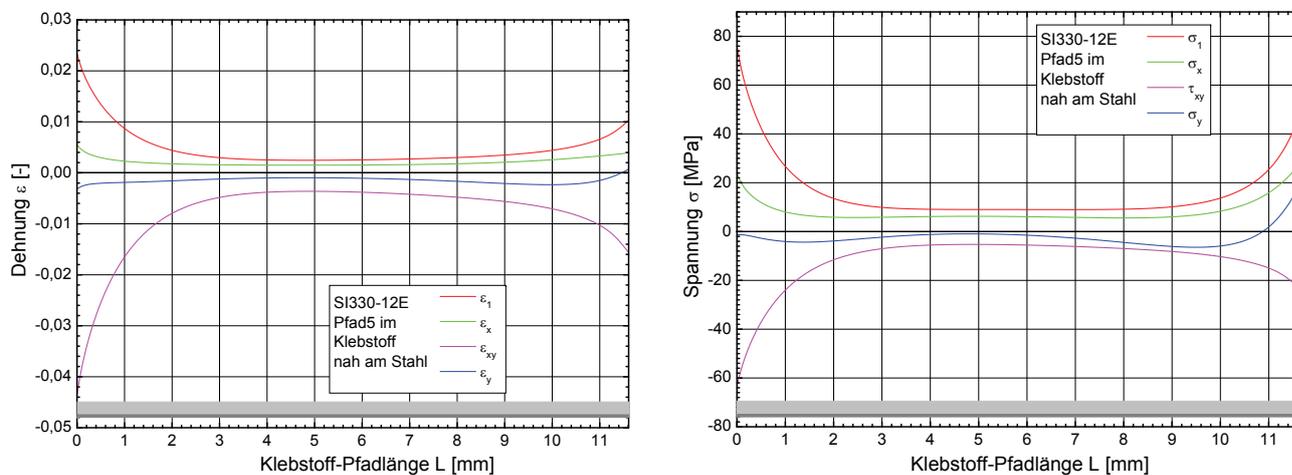


Abb. E.13: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 der Zugscherprobe SI330-12E

Anhang

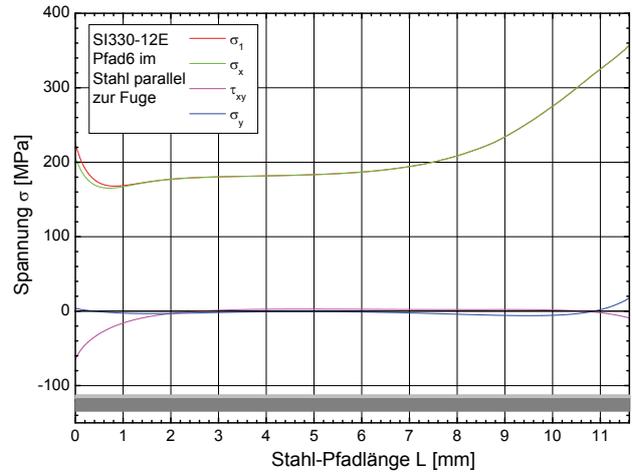
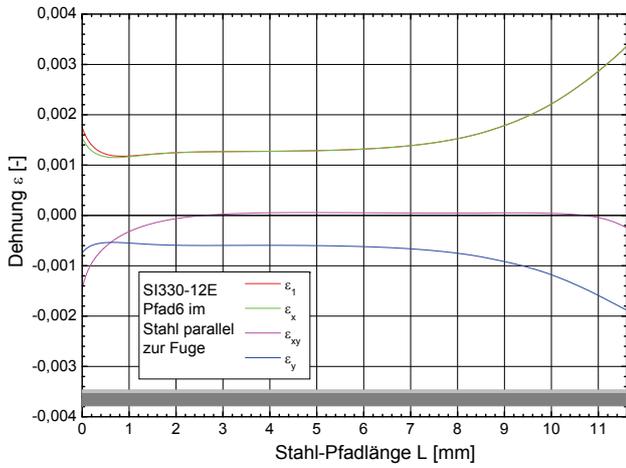


Abb. E.14: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 6 der Zugscherprobe SI330-12E

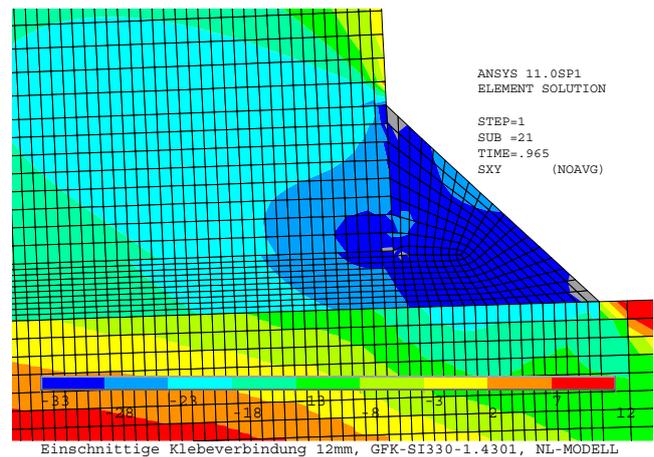
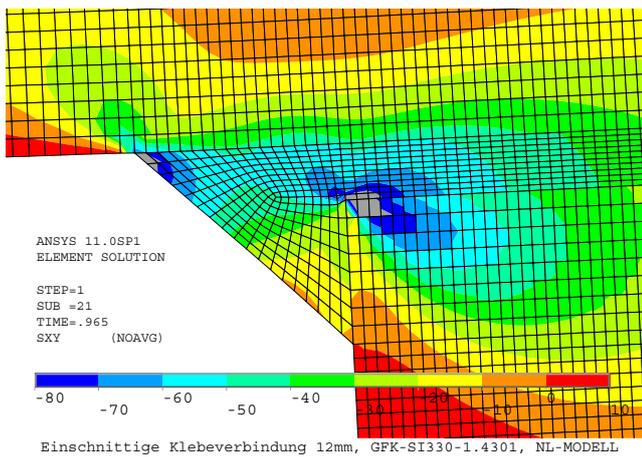


Abb. E.15: links:  $\tau_{xy}$  am Ende Stahl (-80 bis 10), rechts:  $\tau_{xy}$  am Ende GFK (-33 bis 12) für SI330-12E

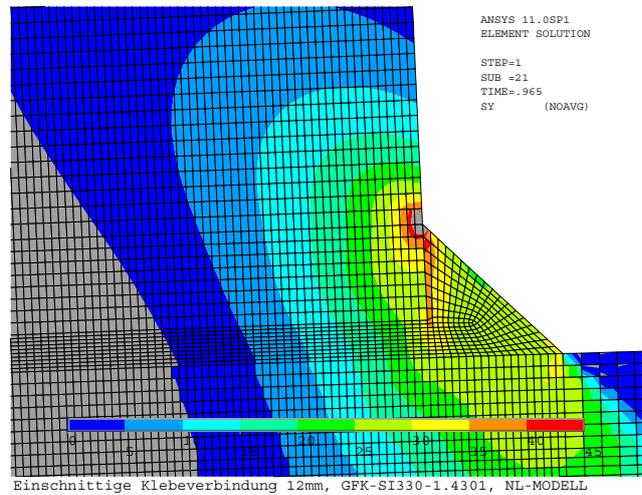
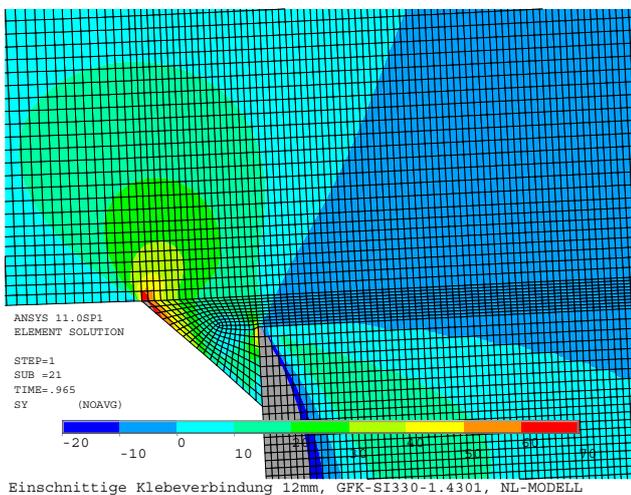
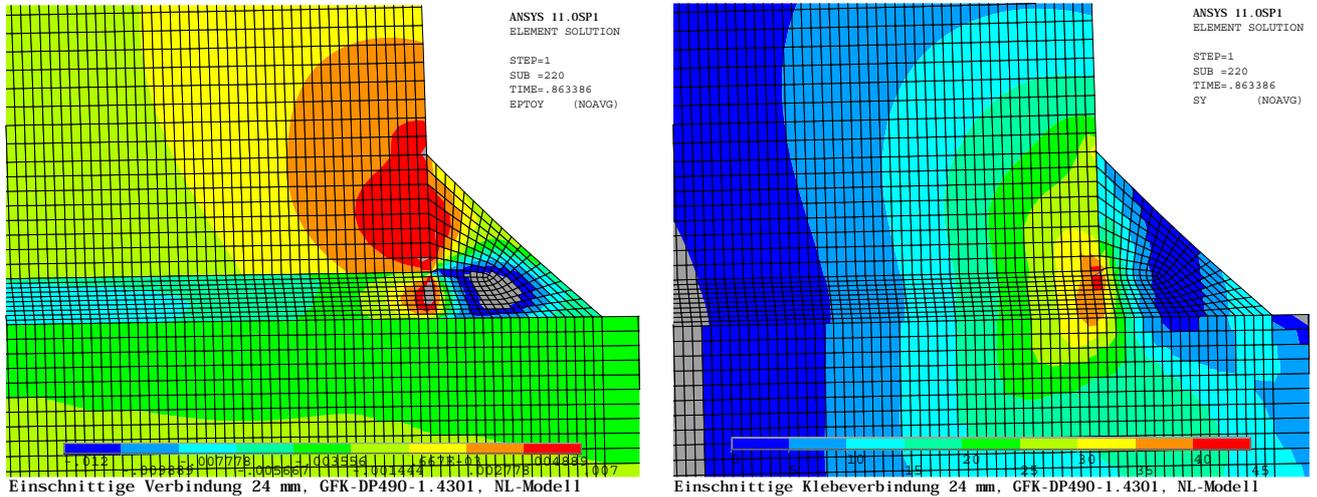
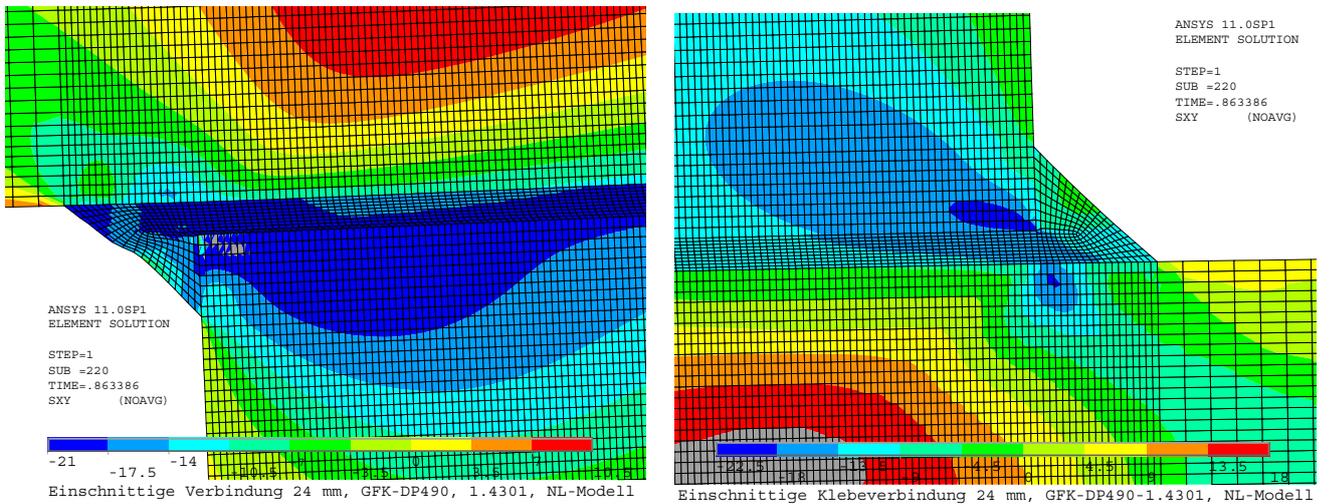


Abb. E.16: links:  $\sigma_y$  am Ende Stahl (-20 bis 70), rechts:  $\sigma_y$  am Ende GFK (0 bis 45) für SI330-12E

**Berechnung der DP490-Zugscherprobe mit 24 mm Überlappung, nichtlinear:**



**Abb. E.17:** links:  $\varepsilon_y$  (-0,012 bis 0,007) im GFK, rechts:  $\sigma_y$  (0 bis 45) im GFK für DP490-24E



**Abb. E.18:** links:  $\tau_{xy}$  (-21 bis 10,5), rechts:  $\tau_{xy}$  (-22,5 bis 18) Klebefugenranddetails für DP490-24E

## F Abbildungen zu den Berechnungen an der Bauteilgeometrie

### Spannungs- und Dehnungspfadplots zur Berechnung der Grundvariante VAR01:

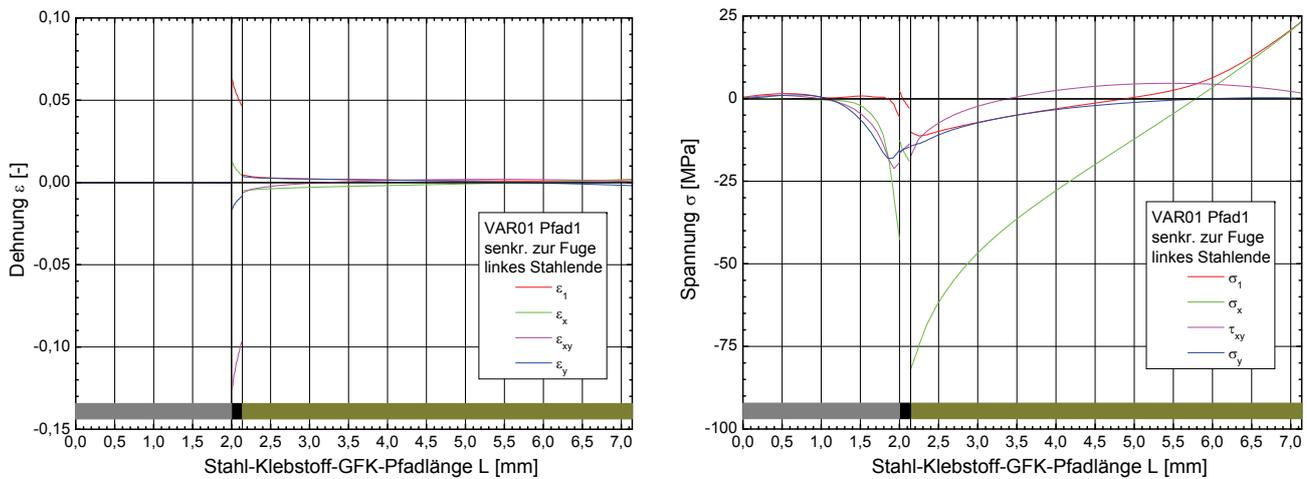


Abb. F.1: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 des Bauteils VAR01

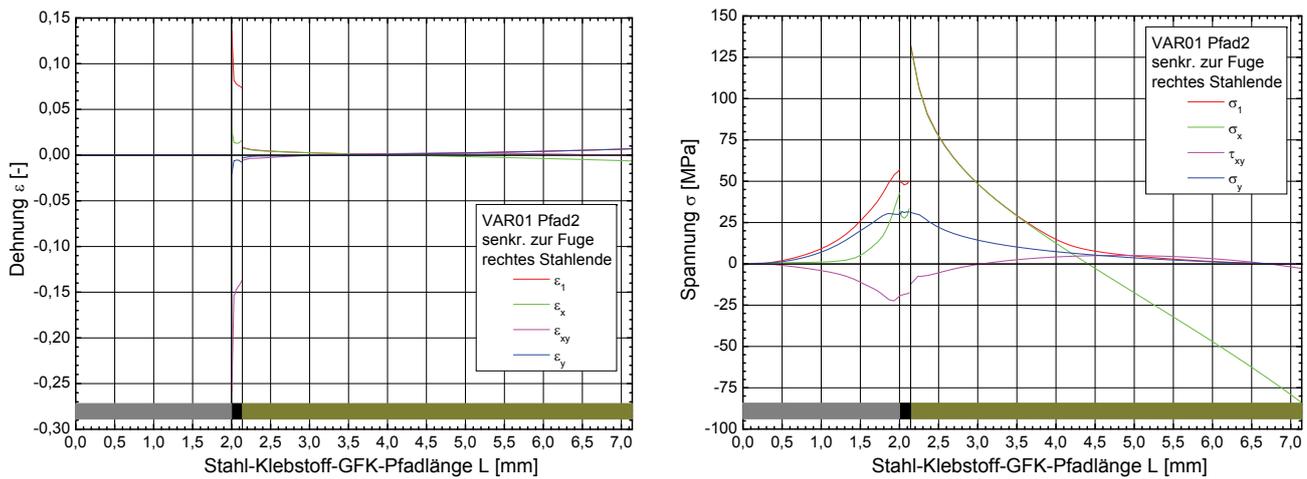


Abb. F.2: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 des Bauteils VAR01

F Abbildungen zu den Berechnungen an der Bauteilgeometrie

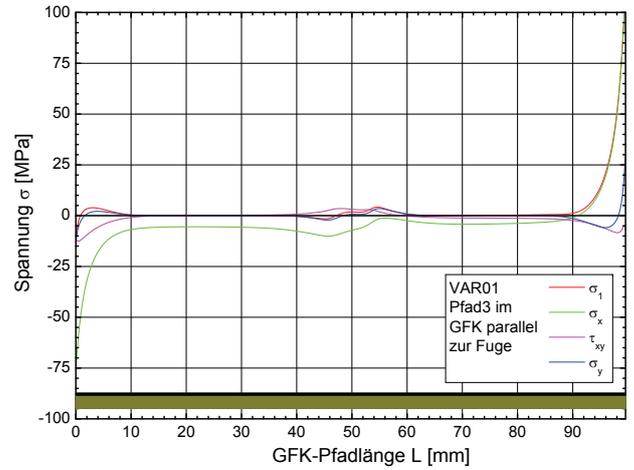
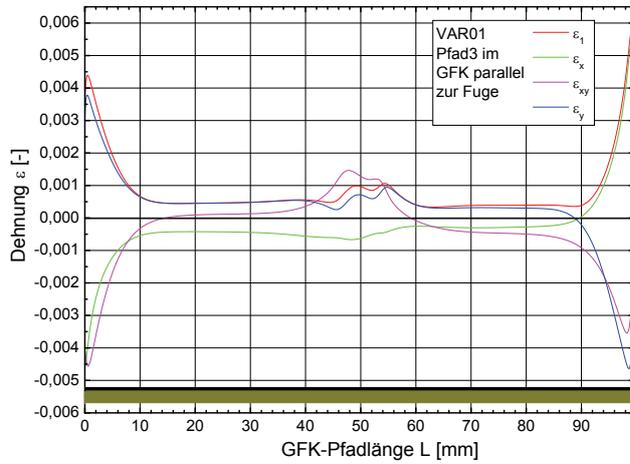


Abb. F.3: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 des Bauteils VAR01

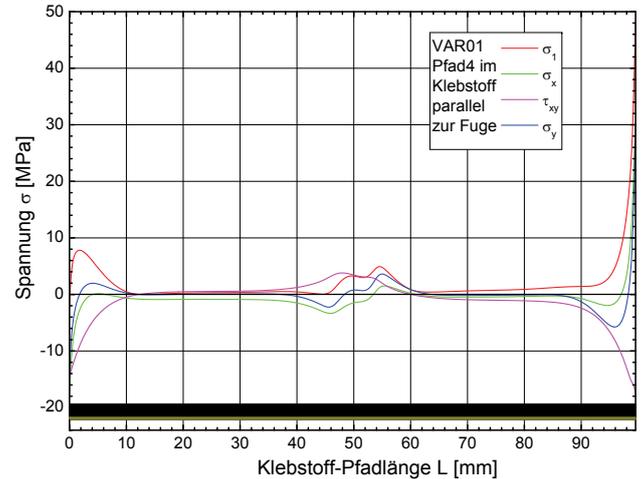
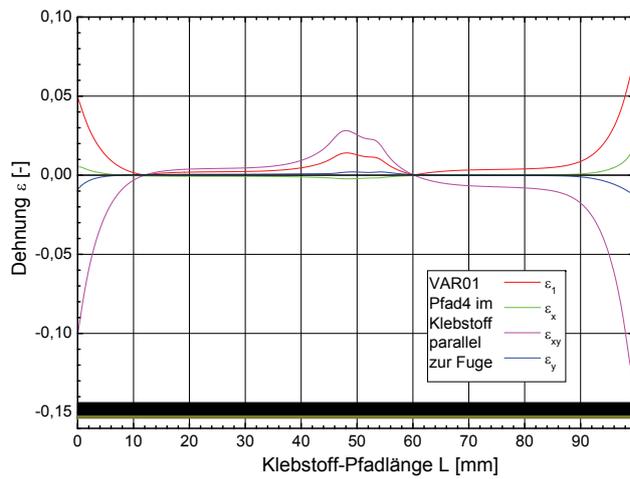


Abb. F.4: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 des Bauteils VAR01

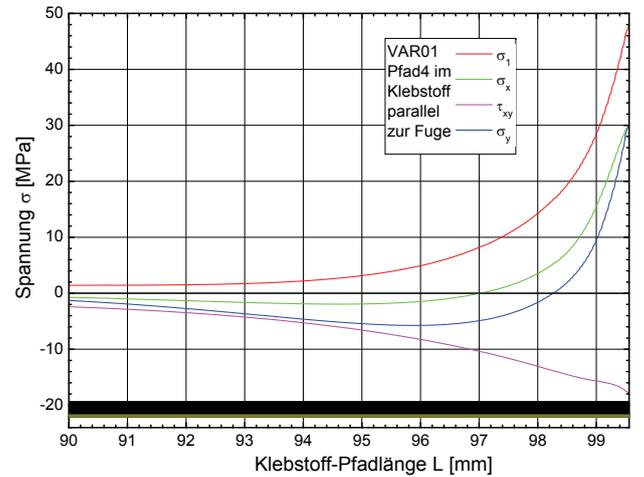
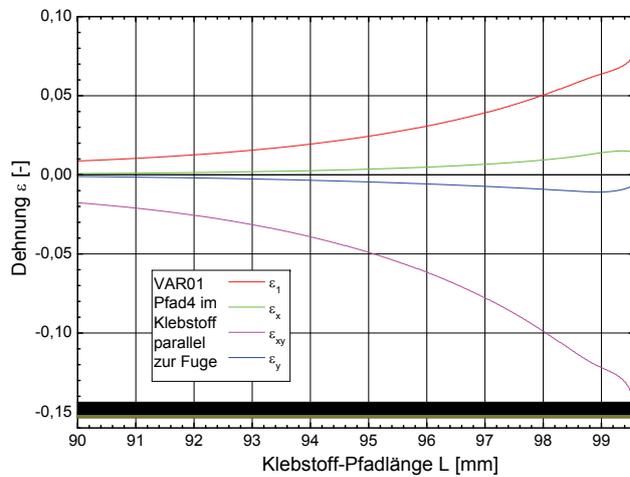


Abb. F.5: rechter 10 mm-Randbereich von Pfad 4 des Bauteils VAR01

Anhang

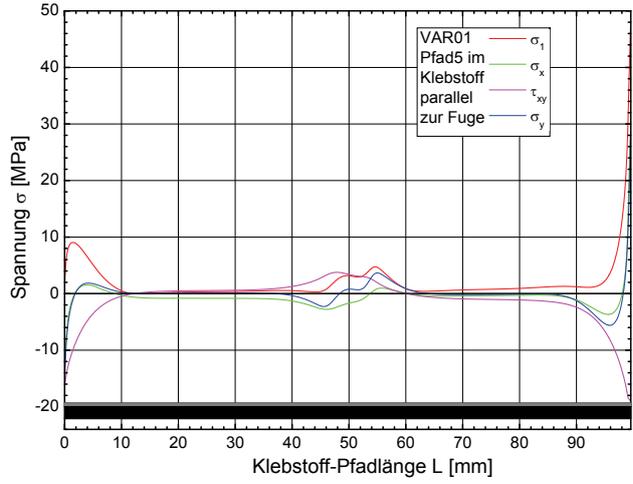
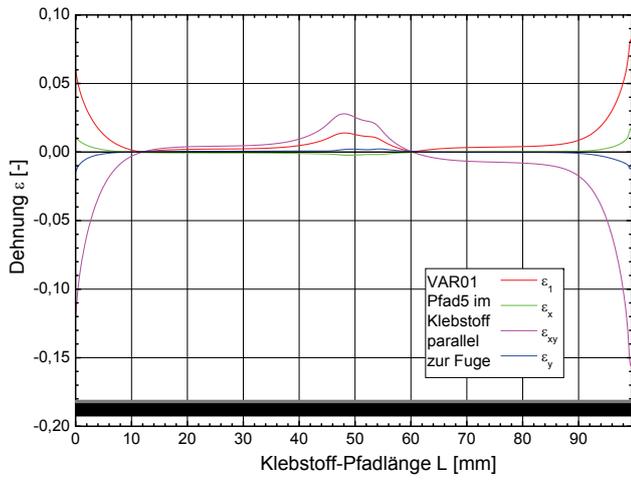


Abb. F.6: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 des Bauteils VAR01

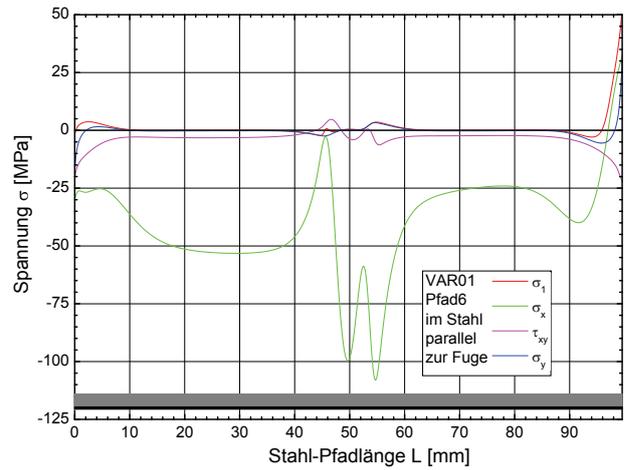
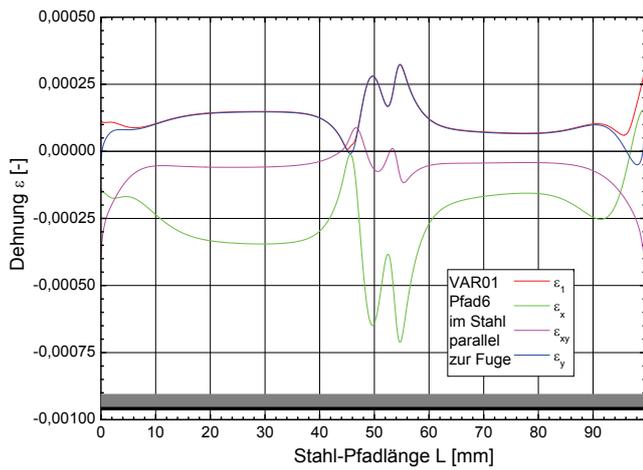
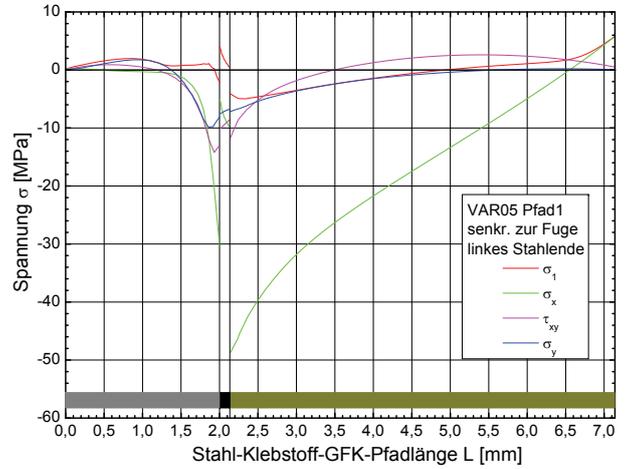
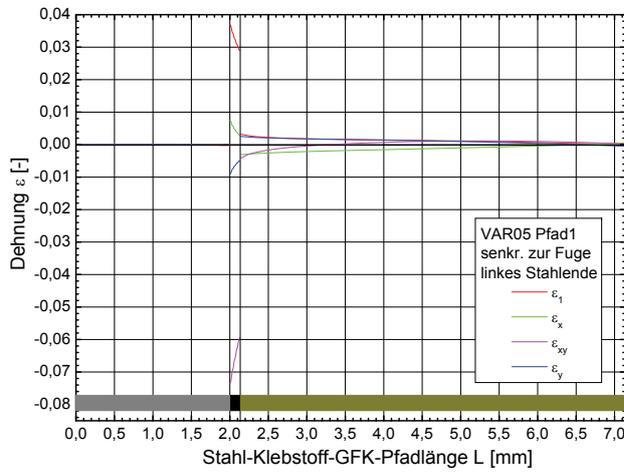
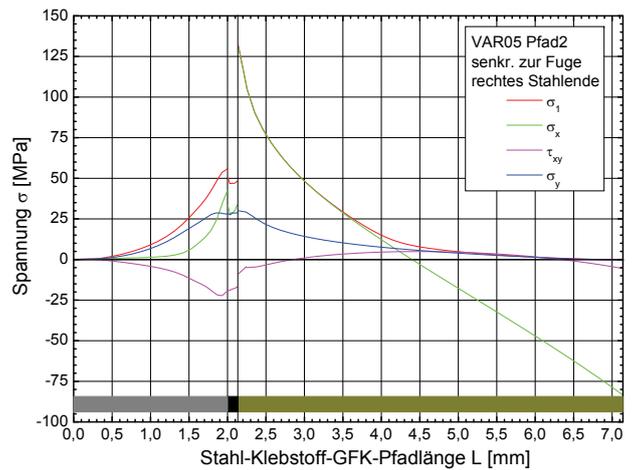
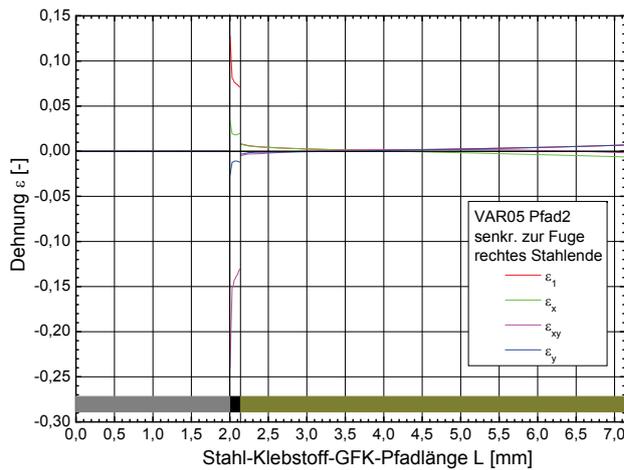


Abb. F.7: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 6 des Bauteils VAR01

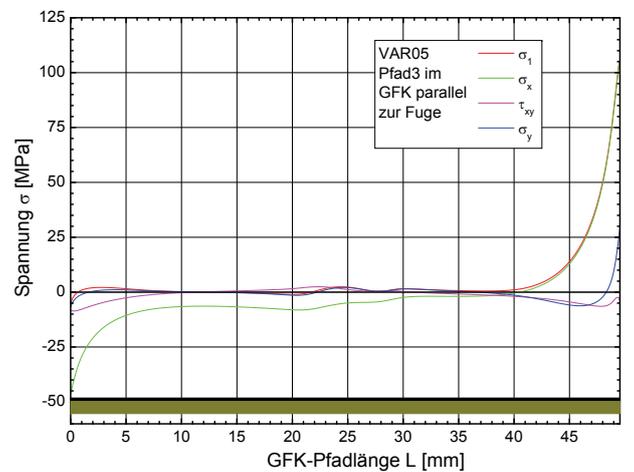
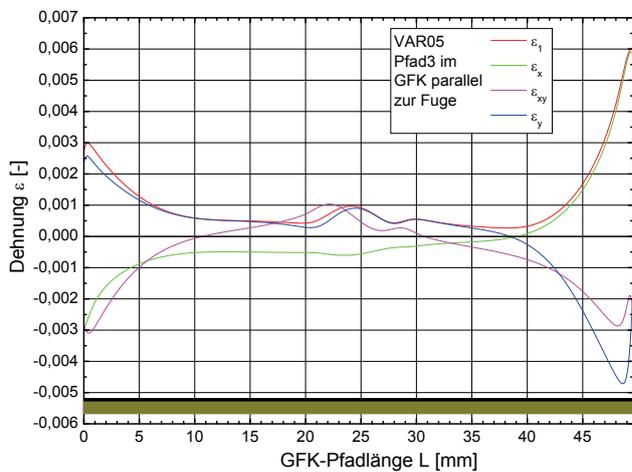
**Spannungs- und Dehnungspfadplots zur Berechnung VAR05 - 50 mm Blech:**



**Abb. F.8:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 des Bauteils VAR05



**Abb. F.9:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 des Bauteils VAR05



**Abb. F.10:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 des Bauteils VAR05

Anhang

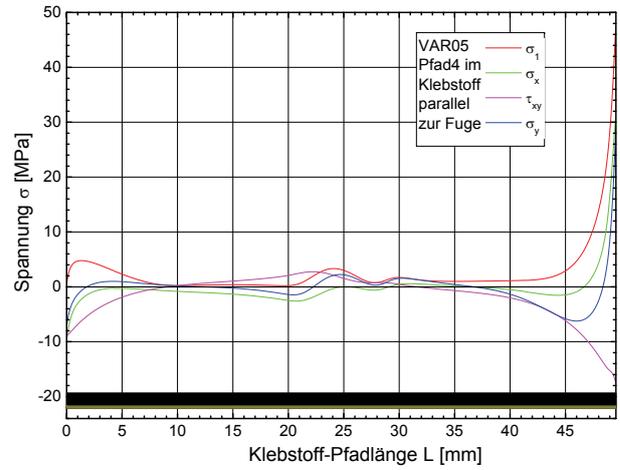
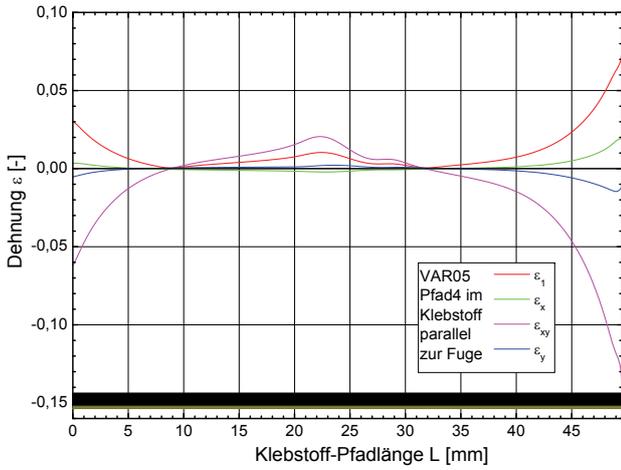


Abb. F.11: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 des Bauteils VAR05

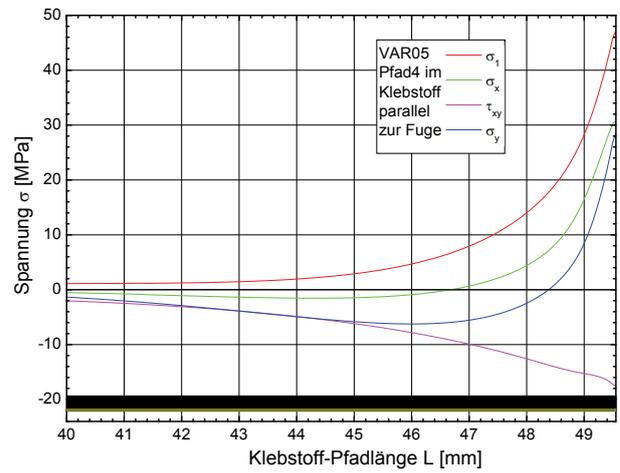
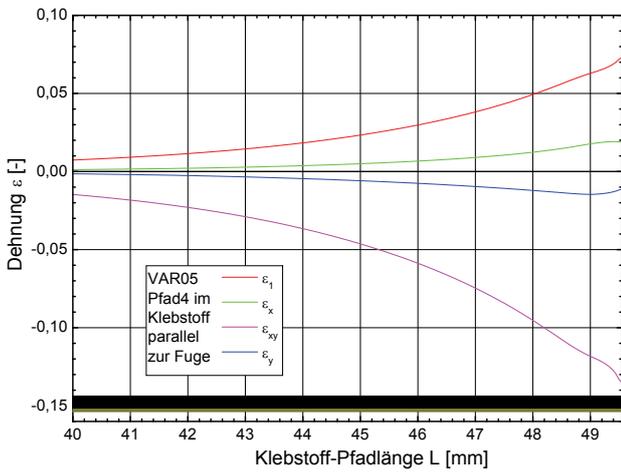


Abb. F.12: rechter 10 mm-Randbereich von Pfad 4 des Bauteils VAR05

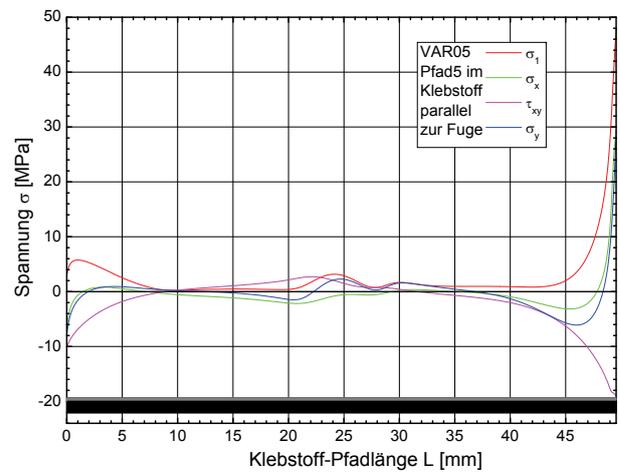
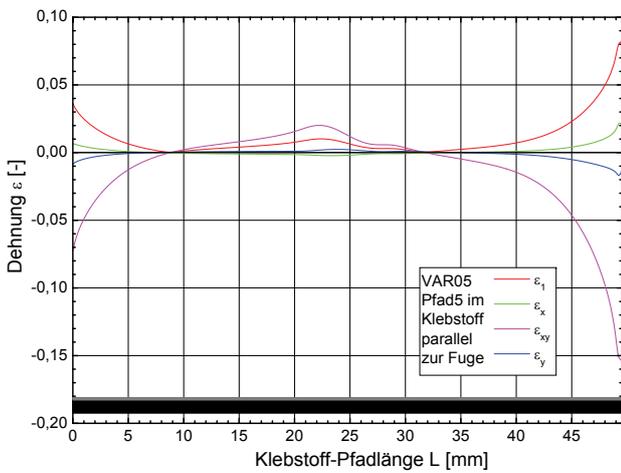
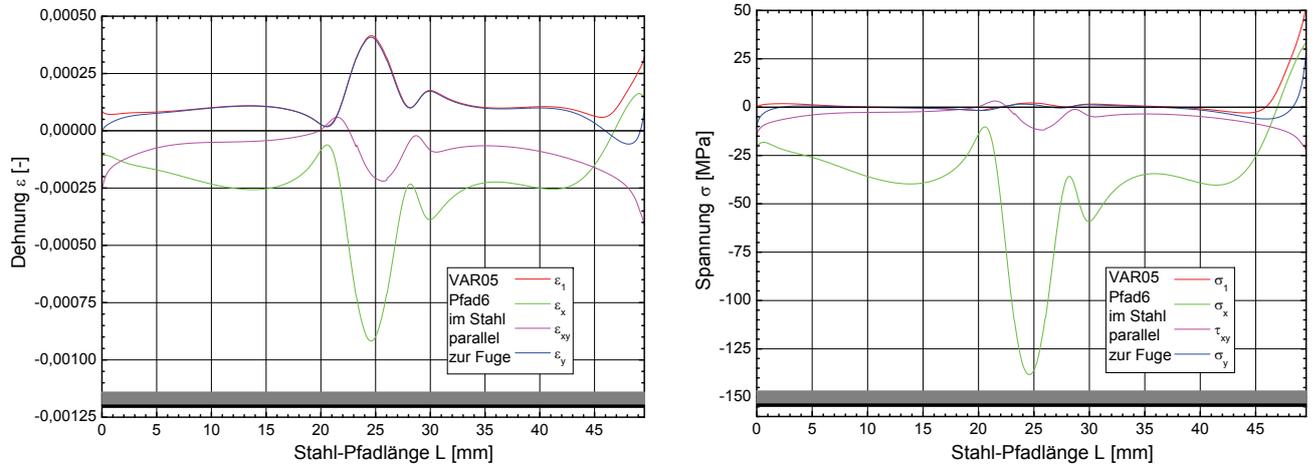


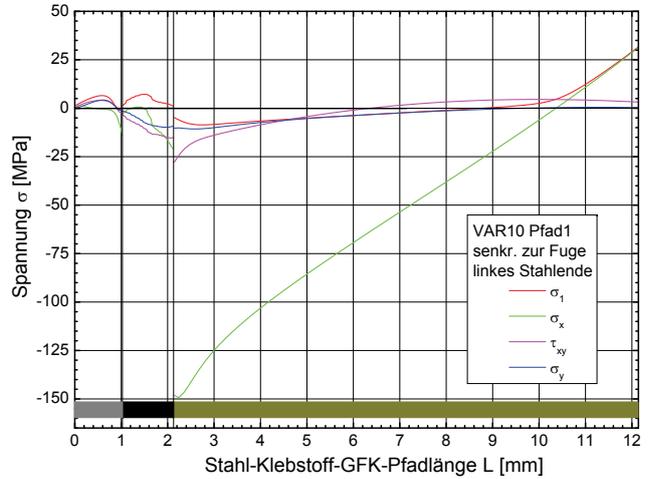
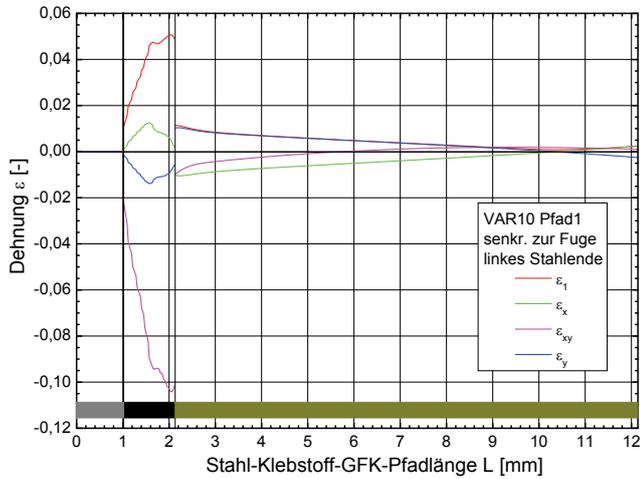
Abb. F.13: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 des Bauteils VAR05

F Abbildungen zu den Berechnungen an der Bauteilgeometrie

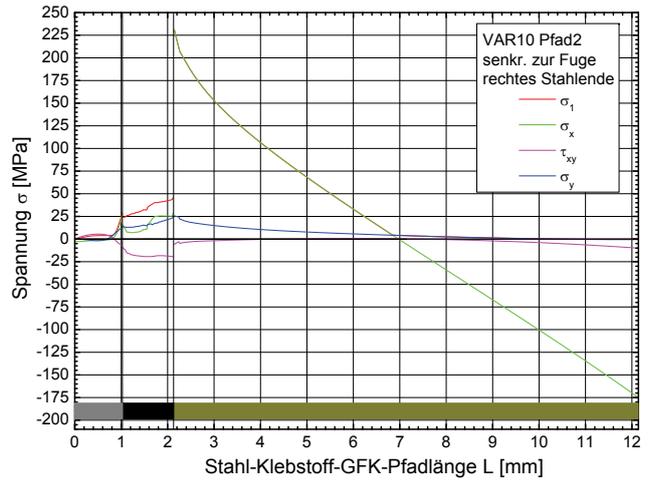
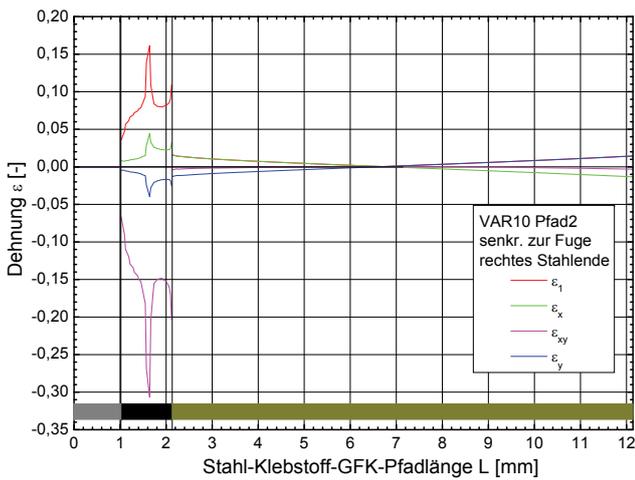


**Abb. F.14:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 6 des Bauteils VAR05

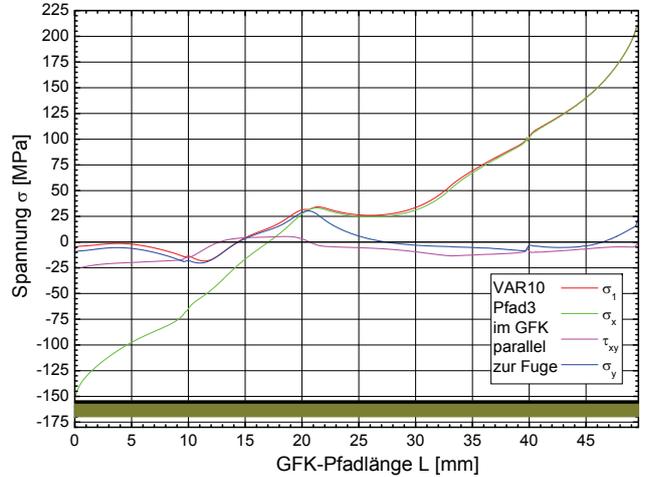
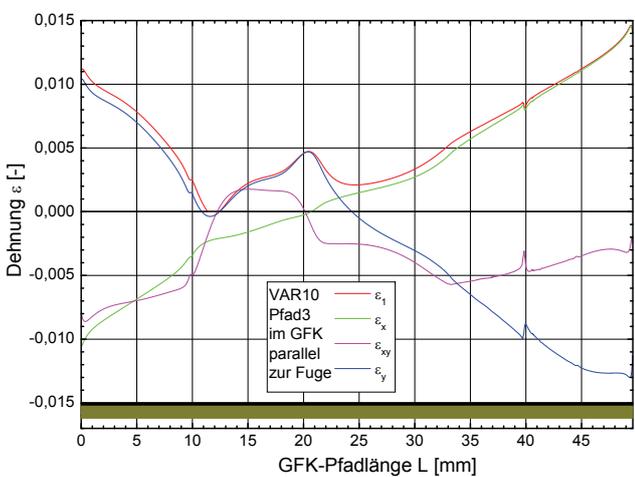
**Spannungs- und Dehnungspfadplots zur Berechnung VAR10 - Kombinationsmodell:**



**Abb. F.15:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 1 des Bauteils VAR10



**Abb. F.16:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 2 des Bauteils VAR10



**Abb. F.17:** berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 3 des Bauteils VAR10

F Abbildungen zu den Berechnungen an der Bauteilgeometrie

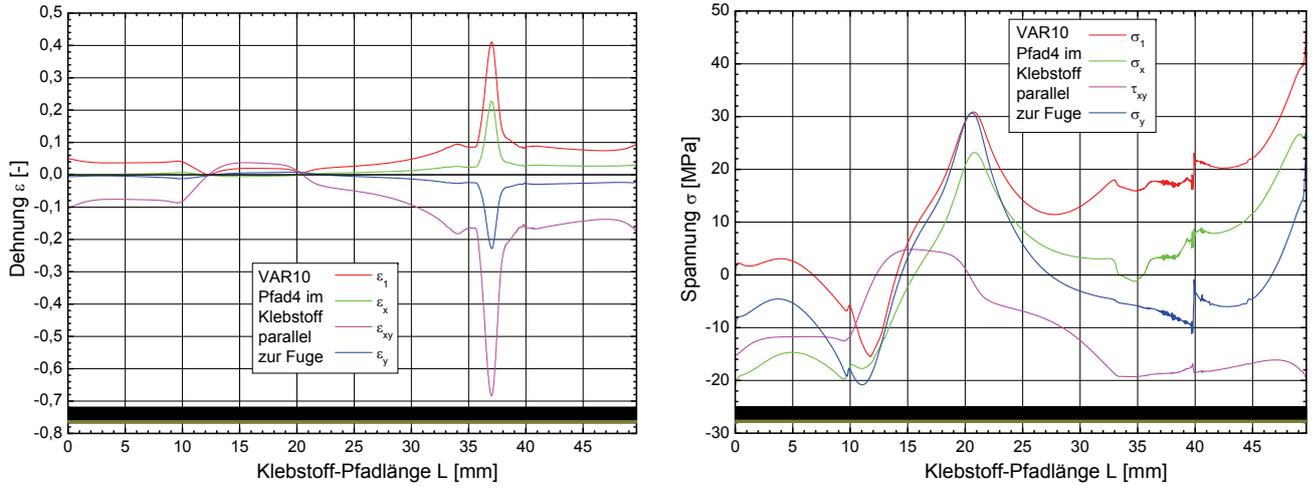


Abb. F.18: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 4 des Bauteils VAR10

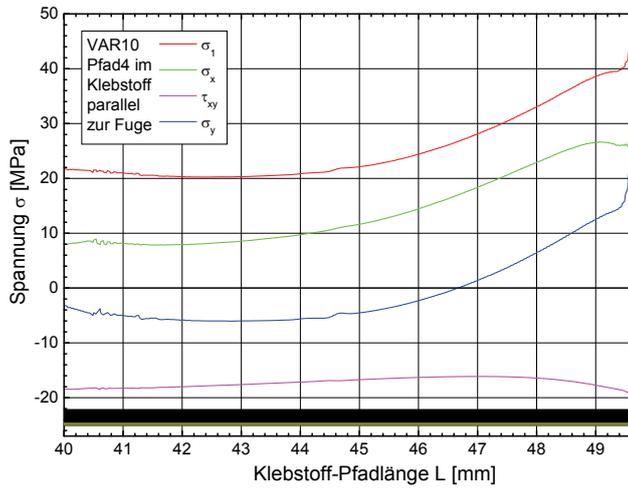


Abb. F.19: berechnete Spannungen im Pfad 4 des Bauteils VAR10 im Bereich der rechten Voute

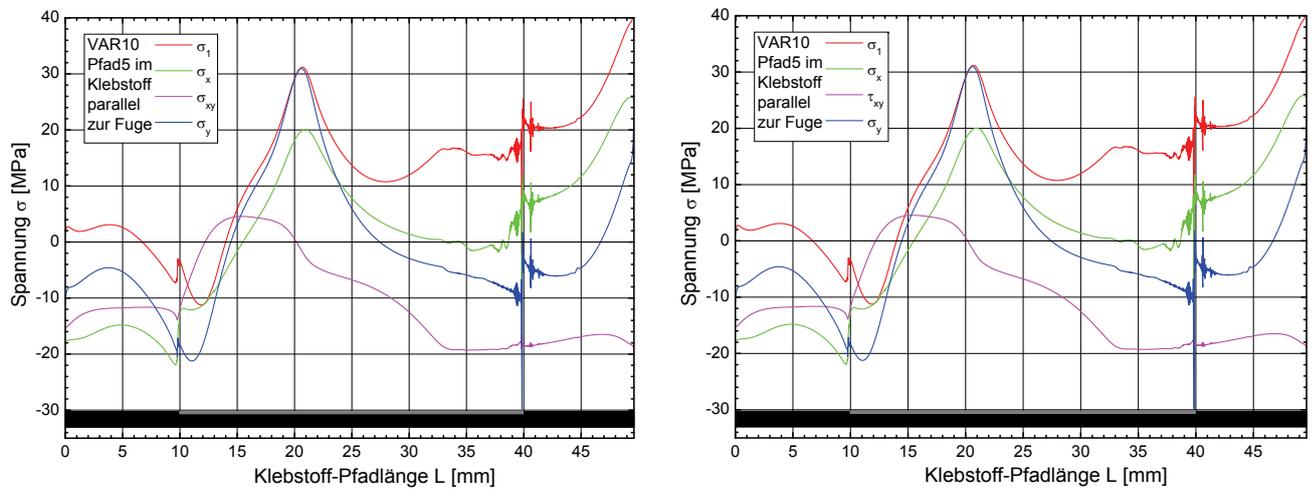
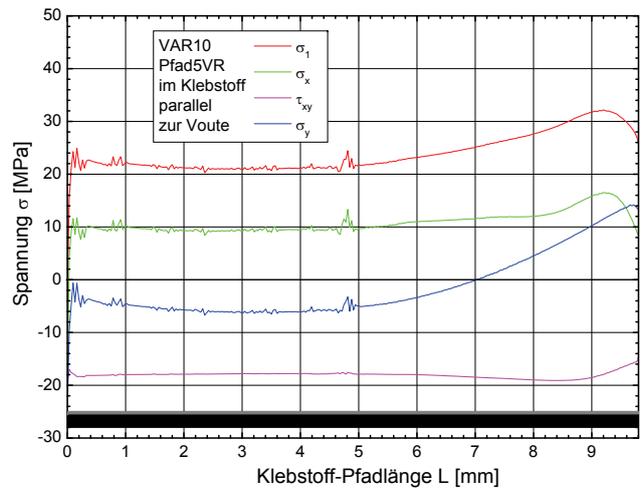
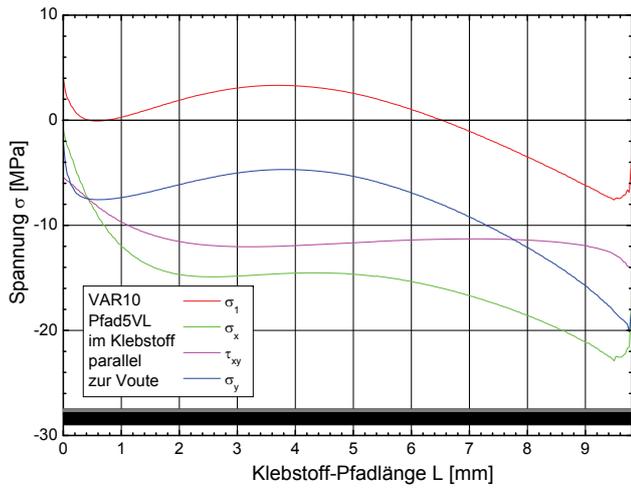


Abb. F.20: berechnete Dehnungen und Spannungen im Pfad 5 des Bauteils VAR10

Anhang



**Abb. F.21:** berechnete Spannungen in den Pfaden 5VL und 5VR des Bauteils VAR10

F Abbildungen zu den Berechnungen an der Bauteilgeometrie

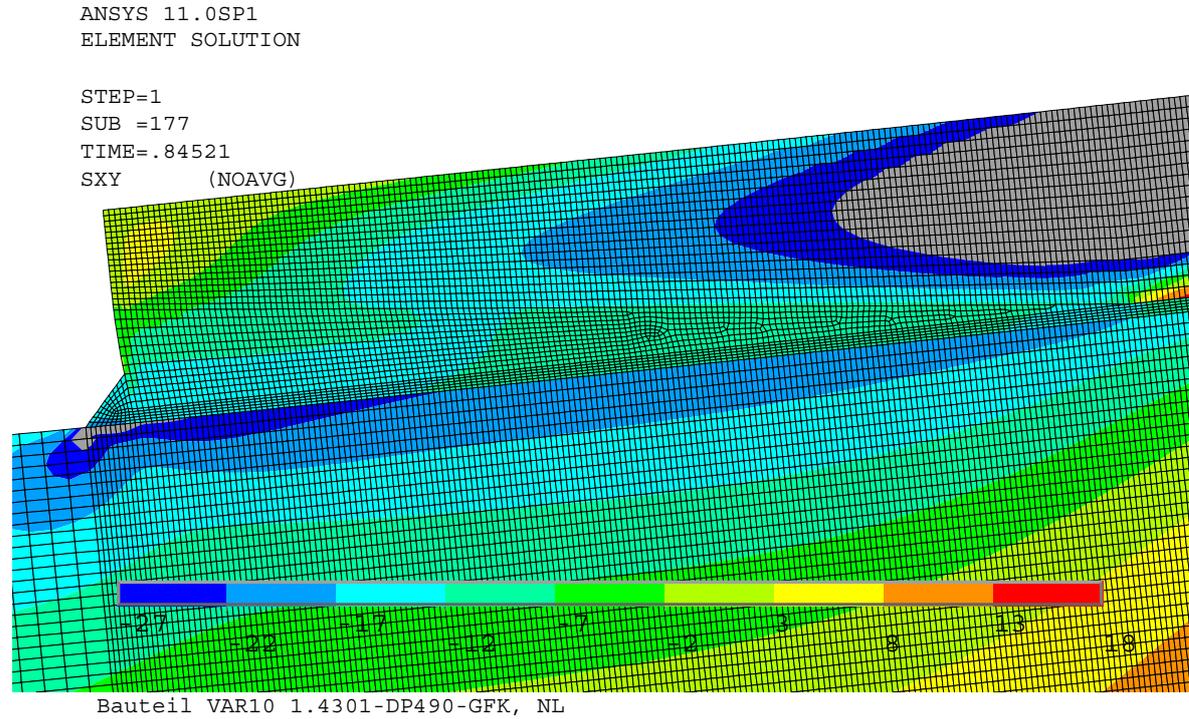


Abb. F.22:  $\tau_{xy}$  (-27 bis 18) für linkes Blechende des VAR10-Kombinationsmodells

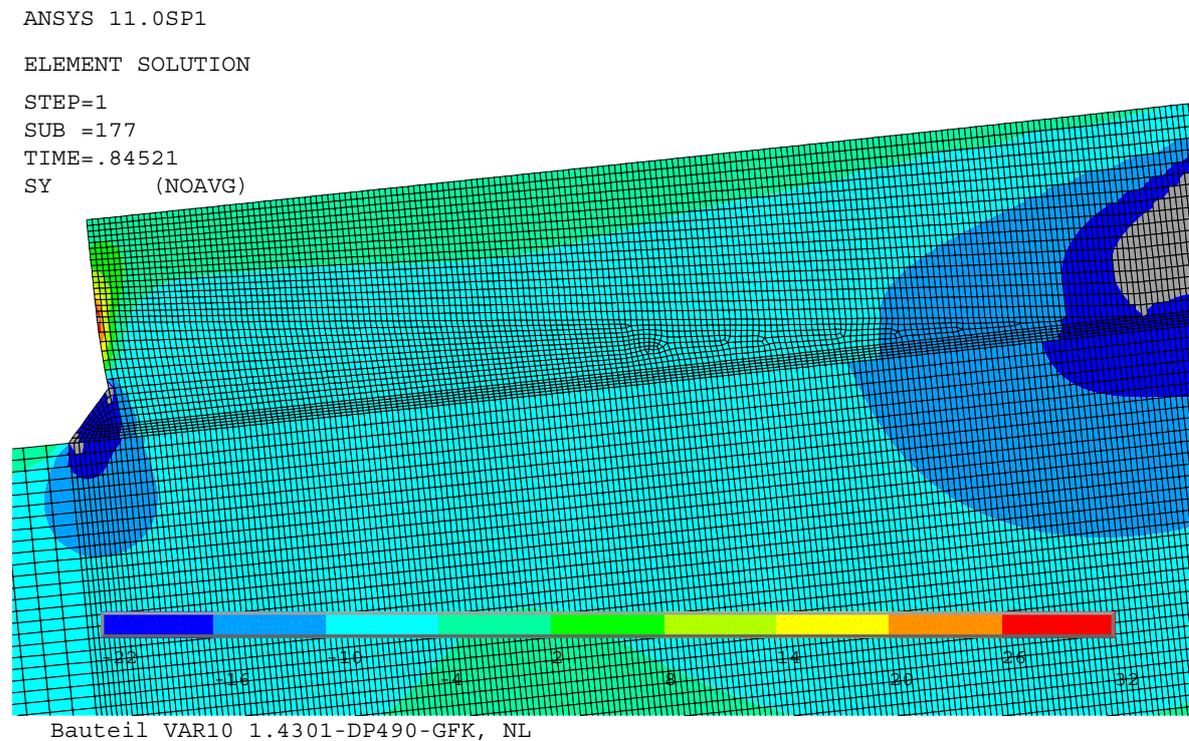


Abb. F.23:  $\sigma_y$  (-22 bis 32) für linkes Blechende des VAR10-Kombinationsmodells

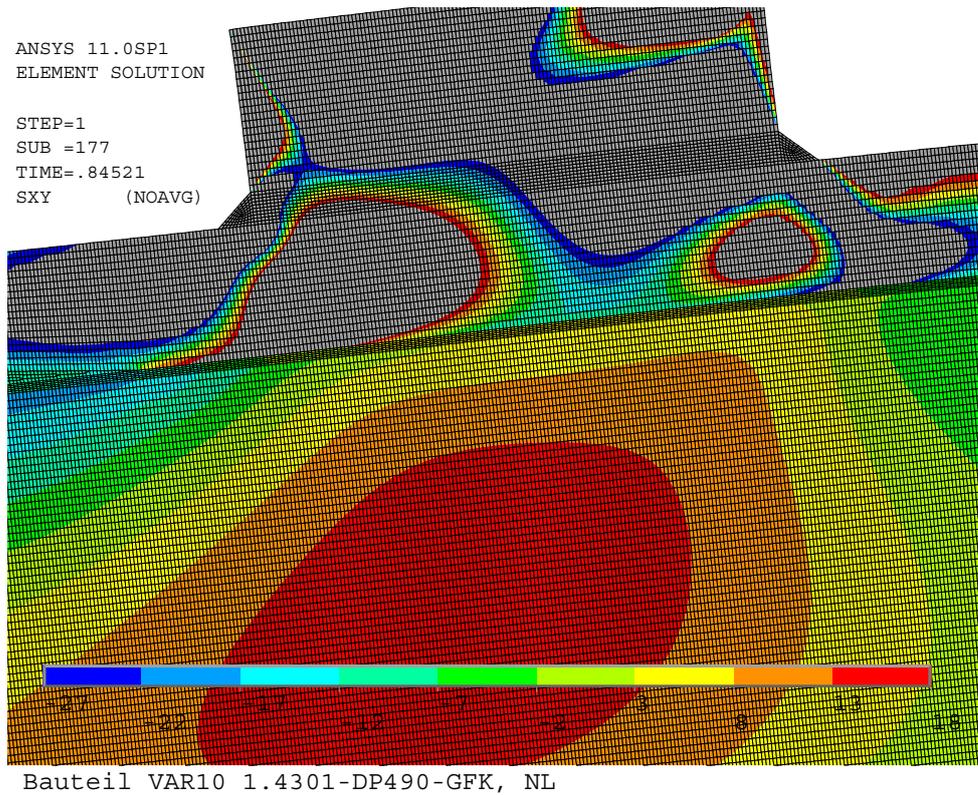


Abb. F.24:  $\tau_{xy}$  (-27 bis 18) für Lasteinleitungsbereich des VAR10 - Kombinationsmodells

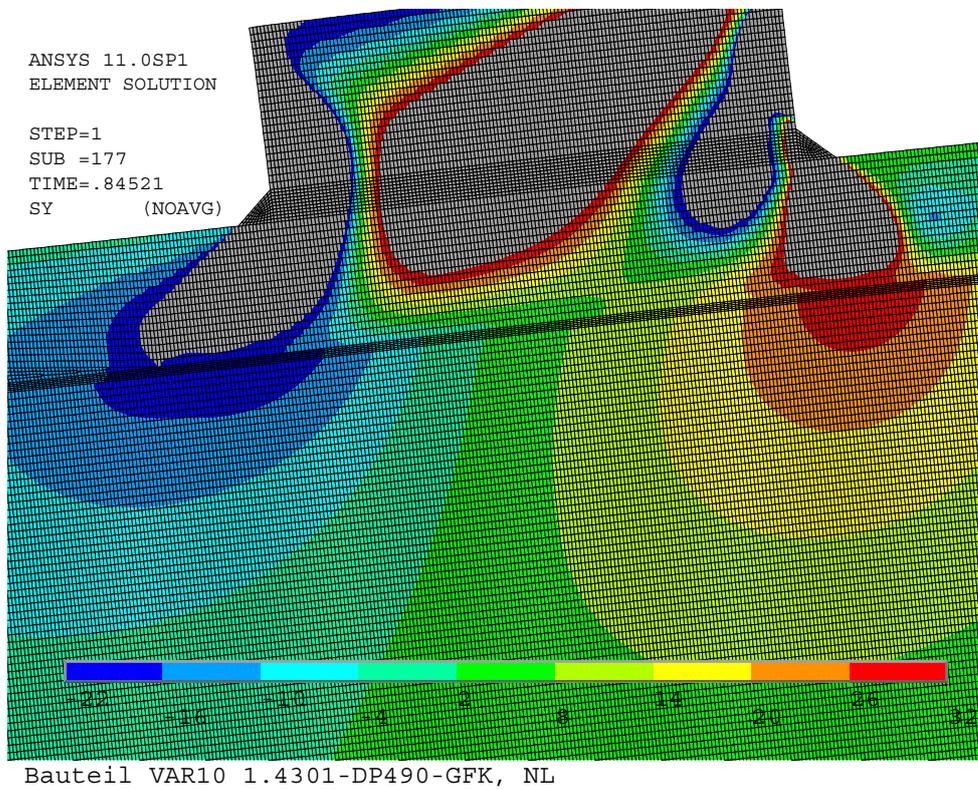
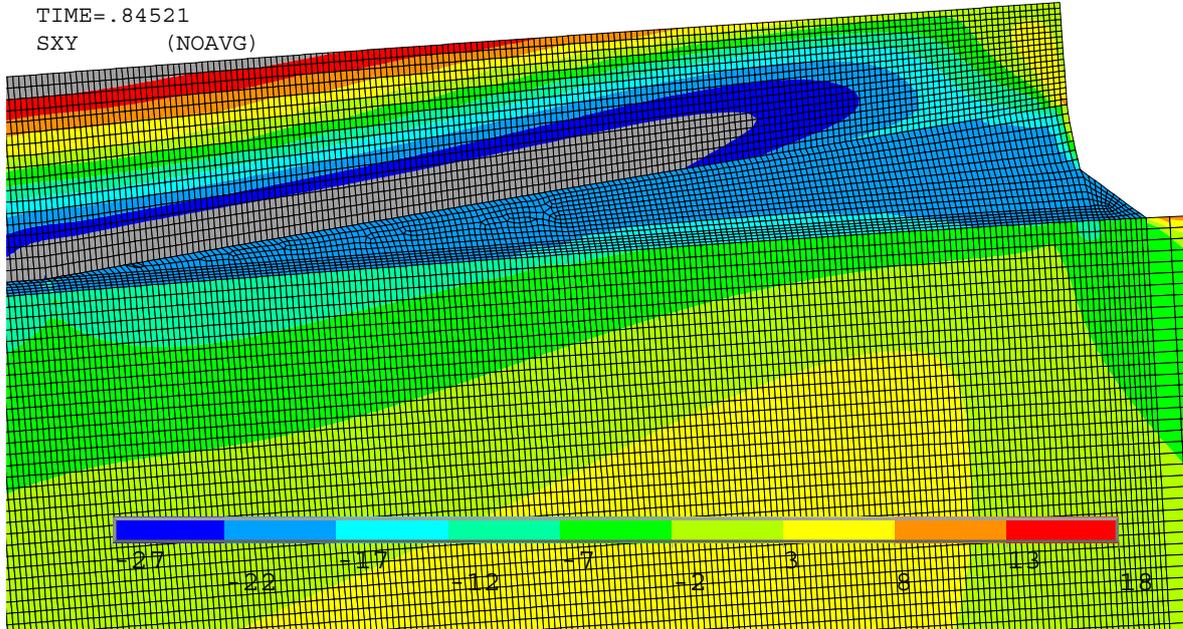


Abb. F.25:  $\sigma_y$  (-22 bis 32) für Lasteinleitungsbereich des VAR10 - Kombinationsmodells

F Abbildungen zu den Berechnungen an der Bauteilgeometrie

ANSYS 11.0SP1  
ELEMENT SOLUTION

STEP=1  
SUB =177  
TIME=.84521  
SXY (NOAVG)

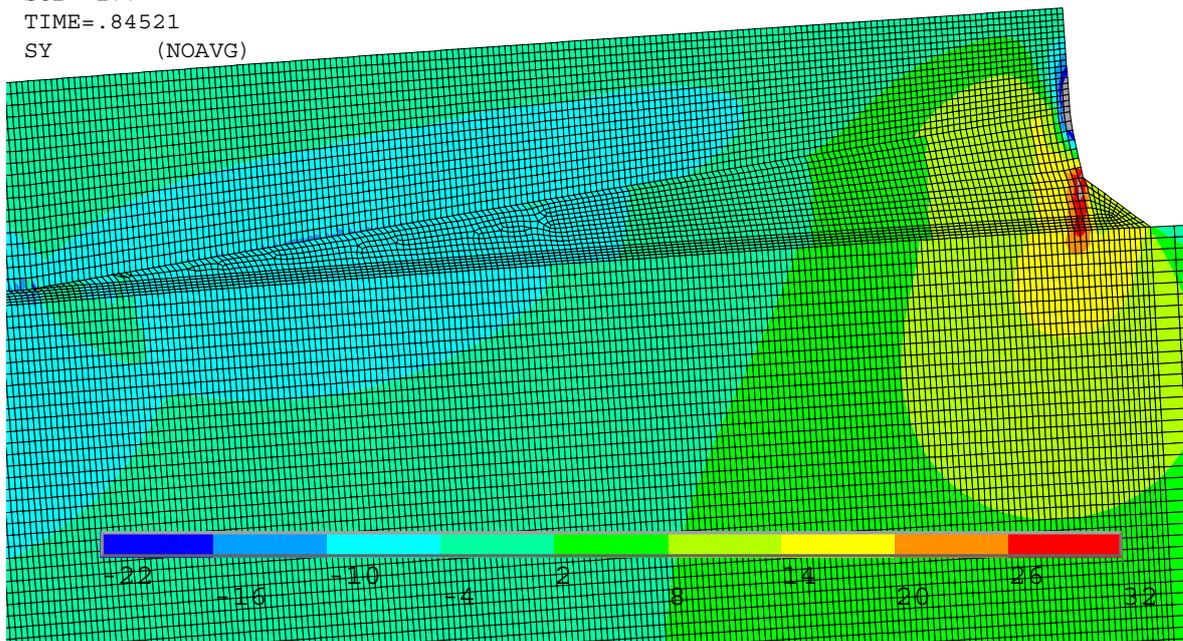


Bauteil VAR10 1.4301-DP490-GFK, NL

**Abb. F.26:**  $\tau_{xy}$  (-27 bis 18) für rechtes Blechende des VAR10 - Kombinationsmodells

ANSYS 11.0SP1  
ELEMENT SOLUTION

STEP=1  
SUB =177  
TIME=.84521  
SY (NOAVG)



Bauteil VAR10 1.4301-DP490-GFK, NL

**Abb. F.27:**  $\sigma_y$  (-22 bis 32) für rechtes Blechende des VAR10 - Kombinationsmodells

## G Lebenslauf

### Persönliche Daten

Stefan Linne  
Am Sportplatz 19a  
99425 Weimar  
Tel.: (03 64 3) 56 44 03  
E-Mail: stefan.linne@mfpa.de

### Beruflicher Werdegang

seit 04 / 2006	wiss. Mitarbeiter, Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
01 / 2006-2010	wiss. Mitarbeiter, Prof. Massivbau II, Bauhaus-Universität Weimar
10 / 2001-2005	wiss. Mitarbeiter, FOMEKK, Bauhaus-Universität Weimar (Forschungsgruppe für materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren mit faserverstärkten Kunststoffen)

### Bildungsweg

09 / 2001	Dipl.-Ing. an der Fakultät Bauingenieurwesen, Prädikat: sehr gut
1996-2001	Bauingenieurstudium an der Bauhaus-Universität Weimar
1995-1996	Wehrdienst bei der Topographietruppe Leipzig
1991-1995	Domgymnasium Naumburg, Abschluß Abitur, Prädikat: sehr gut
1983-1992	Salztorschule Naumburg