

Grundlagen für die Auslegung und Gestaltung  
eines Hybridmaterials für außen liegende, adaptive  
Fassadenbauteile aus Faserverbundkunststoff

Principles for the layout and design of a  
hybrid material to be used in exterior, adaptive  
facade components made of fiber-reinforced plastic

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur  
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Larissa Born**

aus Ratzeburg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Götz Theodor Gresser

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers

Tag der mündlichen Prüfung: 23.09.2020

Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT)  
der Universität Stuttgart

**2020**



## Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT) der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt vor allem meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser, der mir die Möglichkeit der Promotion eröffnete und mich auf meinem Weg stets motivierend und beratend begleitete. Darüber hinaus bedanke ich mich gleichermaßen bei meinem Mitberichter Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Milwich, die mir bei der Bearbeitung meines Promotionsvorhabens fortwährend mit neuen Anregungen und Ratschlägen zur Seite standen.

Überdies möchte ich mich bei meinen Kollegen und Kolleginnen bedanken, die mir durch gemeinsam geführte fachliche Diskussionen neue Denkanstöße gaben. Mein Dank gilt im Besonderen auch den MitarbeiterInnen der Prüflabore sowie der mechanischen und der Elektronik-Werkstatt der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung, die mir Prüftechnik zur Verfügung stellten und ihr Wissen mit mir teilten.

Für die fleißigen Anstrengungen meiner Studentinnen meine Arbeitsanweisungen und Versuchsreihen umzusetzen, möchte ich mich ebenso bedanken. Die Ergebnisse, die wir erarbeitet haben, sind Grundlage meiner Doktorarbeit. Nicht zuletzt möchte ich mich bei all meinen KorrekturleserInnen für die Stunden bedanken, die sie investierten, um zum Feinschliff meiner Dissertation beizutragen. Euer konstruktives, sachliches und fachliches Feedback war mir sehr wichtig.

Abschließend möchte ich meinen Eltern, meinem Partner und meiner Familie für den liebevollen Rückhalt und die verständnisvolle Unterstützung, die sie mir stets zuteilwerden ließen, danken.

Stuttgart, Mai 2020

Larissa Born



## Kurzfassung

Der Bau moderner, lichtdurchfluteter Gebäude, die damit verbundene Erwärmung im Gebäudeinneren und die daraus folgende hohe Klimaanlageennutzung, um die Temperatur möglichst konstant zu halten, hat einen zunehmenden Energieverbrauch zur Folge. Daher wird, im Kontext der Ressourceneffizienz, die Verschattung solcher Gebäude zunehmend relevant. Um ein Aufheizen im Gebäudeinneren zu vermeiden und somit den Energieverbrauch durch Klimaanlageensysteme zu reduzieren, sollten solche Verschattungssysteme nach Möglichkeit extern angebracht werden. Herkömmliche bewegliche Mechanismen beruhen auf Starrkörpermechanismen, die gelenkig miteinander verbunden werden. Insbesondere bei komplex gekrümmten Glasfassaden führen diese mechanischen Gelenke zu wartungsintensiven Konstruktionen. Eine robustere Lösung ist ein adaptives System, dessen Beweglichkeit aus lokaler Materialnachgiebigkeit resultiert. Steife Komponenten eines Bauteils können dabei um eine biegeweiße Rotationsachse bewegt werden.

Für diesen Anwendungsfall wird in dieser Arbeit ein Hybridverbundmaterial bestehend aus Elastomer und duroplastischem Faserverbundkunststoff entwickelt, das die Integration lokal nachgiebiger Bereiche in ein steifes Bauteil erlaubt. Das Material wird so ausgelegt, dass es die Anforderungen an ein Außenfassadenbauteil erfüllt. Kern der Arbeit ist die Darstellung der innerhalb dieser Arbeit aufgebauten Methodik zur Entwicklung von Gelenkbauteilen aus Faserverbundkunststoff und die Vorstellung der Auslegungskriterien, die bei der BauteilAuslegung Berücksichtigung finden müssen.

Innerhalb dieser Arbeit wird überdies ein zyklischer Biegeprüfstand entwickelt, der die Biegung eines Prüfkörpers, dessen Abmaße denen eines Zugprüfkörpers nach DIN EN ISO 527-4 entsprechen, um  $180^\circ$  in beide Rotationsrichtungen, erlaubt. Der Kräfteintragungswinkel ist während der Biegebewegung konstant und die Kraftmessung erfolgt direkt über Biegebalken ohne Reibungsverluste. Er ist die Grundlage für die experimentelle Untersuchung der Auslegungskriterien von FVK-Gelenkbauteilen. Im Anschluss an die Biegeprüfung ist, aufgrund der Abmaße des Prüfkörpers, eine Zugprüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 möglich. So kann eine vergleichende Aussage über die Restzugfestigkeit zyklisch geprüfter FVK-Gelenkbauteile getroffen werden.

Zunächst werden die Materialien hinsichtlich der Anforderungen an Außenfassadenbauteile geprüft und ausgewählt. Es erfolgt die Berechnung der Biegesteifigkeit und Zugfestigkeit des unsymmetrisch aufgebauten Hybridlaminats sowie die Festlegung der Auslegungskriterien. Abschließend wird, auf Basis von mechanischen Prüfungen der Auslegungskriterien und Regressionsanalysen, ein Modell aufgestellt, das die Prognose der mechanischen Eigenschaften eines FVK-Gelenkbauteils sowie die Festlegung der Bauteilgeometrie unter Vorgabe der Restzugfestigkeit nach 5.000 Lastspielen erlaubt.



## Abstract

The construction of modern, light-flooded buildings, the associated heating inside the building and consequently the high usage of air conditioning systems to keep the temperature as constant as possible, results in increasing energy consumption. The shading of such building surfaces is becoming increasingly relevant in the context of resource efficiency. To avoid heating of the building interior and thus reduce energy consumption by air conditioning systems, such shading systems should be installed externally if possible. Conventional movable mechanisms are based on rigid-body mechanisms that are connected to each other by joints. Such mechanical joints lead to maintenance-intensive constructions, especially in the case of complex curved glass facades. A more reliable solution is an adaptive system whose mobility results from local material flexibility. The rigid parts can be moved around a flexible axis of rotation.

In this thesis, a hybrid composite material consisting of elastomer and thermosetting fiber-reinforced plastic is developed, which allows the integration of local compliant zones into a rigid component. The material is dimensioned to meet the requirements of an exterior facade component. The focus of this work is the presentation of the layout methodology established within this work for the development of hinge components made of fiber-reinforced plastic as well as the presentation of the design criteria that must be considered for the component design.

Within this thesis, a cyclic bending test rig is also developed, which allows the bending of a test specimen, sized like a tensile test specimen according to DIN EN ISO 527-4, by 180° in both directions of rotation. The force application angle is constant during the bending movement and the force measurement is performed directly via bending beams without friction losses. The test rig is the basis for the experimental investigations of the design criteria of a hinge component. Due to the dimensions of the test specimen, a tensile test based on DIN EN ISO 527-4 is possible subsequently to the bending test in order to make a comparative statement about the residual strength of the tested hinge component.

Materials are first tested and selected regarding the requirements for exterior facade components. The bending stiffness and tensile strength of the asymmetrically built-up hybrid laminate are calculated, and the design criteria are determined. A model is developed after testing the design criteria, based on regression analysis, which allows the prediction of the tensile strength and bending properties as well as the definition of the component geometry under specification of the residual tensile strength after 5,000 load cycles.





# Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung .....	I
Kurzfassung .....	III
Abstract .....	V
Inhaltsverzeichnis .....	VII
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
Nomenklatur .....	XI
<b>1. Einleitung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand der Wissenschaft und Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Starrkörper- und Nachgiebigkeitsmechanismen .....	5
2.2 Faserverstärkte Gelenke .....	7
2.3 Adaptive Fassadenverschattungen aus Faserverbundkunststoff .....	9
<b>3. Zielsetzung, Arbeitshypothesen und Lösungsweg .....</b>	<b>13</b>
<b>4. Materialien, Prozesse und Methoden .....</b>	<b>17</b>
4.1 Materialien .....	17
4.1.1 Textile Flächengebilde .....	17
4.1.2 Matrixsysteme .....	18
4.1.3 Folienkaschierungen .....	19
4.2 Prozesse .....	20
4.2.1 Vakuuminfusionsprozess .....	20
4.2.2 Heißpressverfahren .....	21
4.3 Prüfmethode .....	21
4.3.1 2-Punkt-Biegeprüfung .....	23
4.3.2 3-Punkt-Biegeprüfung .....	26
4.3.3 Dauerknickfestigkeit .....	27
4.3.4 Zug- und Schubprüfung .....	27
4.3.5 T-Schälprüfung .....	28
4.3.6 Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse .....	29
4.3.7 Brandverhalten .....	29
4.3.8 Umweltsimulation im Klimaschrank und Gelbwertmessung .....	30
4.4 Statistische Methoden .....	31
4.4.1 Varianzanalyse .....	31
4.4.2 Regressionsanalyse .....	32

<b>5. Materialentwicklung .....</b>	<b>33</b>
5.1 Steifigkeitsuntersuchung .....	34
5.2 Oberflächenkaschierung und Witterungsbeständigkeit.....	38
5.3 Verbundfestigkeit unter Mode I-Belastung.....	43
5.4 Temperaturstabilität.....	46
5.5 Brandverhalten nach Baustoffklasse B2.....	49
5.6 Zusammenfassung Entwicklungsmethodik und ausgewählte Einzelschichten des Hybridverbunds.....	50
<b>6. Analytische Berechnung der Laminateneigenschaften des Hybridverbunds.....</b>	<b>53</b>
6.1 Zugfestigkeit.....	54
6.2 Biegesteifigkeit.....	60
<b>7. Prüfmethodik für zyklische Biegeprüfung.....</b>	<b>67</b>
7.1 Entwicklung, Konstruktion und Bau eines zyklischen Biegeprüfstands.....	68
7.2 Auswertungsmethodik für zyklische Biegeprüfungen .....	72
<b>8. Auslegungsmodell für Gelenkbauteile .....</b>	<b>77</b>
8.1 Bestimmung der relevanten Auslegungskriterien .....	77
8.2 Analyse der Auslegungskriterien eines Gelenkbauteils .....	89
8.3 Auslegungsmodell für die Prognose der Materialkenndaten .....	98
<b>9. Zusammenfassung .....</b>	<b>109</b>
<b>10. Ausblick.....</b>	<b>113</b>
Formelverzeichnis.....	XIII
Abbildungsverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis .....	XIX
Quellen- und Literaturverzeichnis .....	XXI

# Abkürzungsverzeichnis

AFK.....	aramidfaserverstärkter Kunststoff
ANOVA .....	Varianzanalyse (engl. Analysis of Variance)
CFK.....	carbonfaserverstärkter Kunststoff
CLT .....	Klassische Laminattheorie (engl. Classical Laminate Theory)
DMTA.....	Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse
DoE .....	statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments)
FVK.....	Faserverbundkunststoff
GFK.....	glasfaserverstärkter Kunststoff
LDPE.....	Weich-Polyethylen (engl. Low-Density Polyethylene)
PET .....	Polyethylenterephthalat
PVC.....	Polyvinylchlorid
TPC .....	Thermoplastische Copolyester-Elastomere
TPE .....	Thermoplastisches Elastomer
TPU .....	Thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis
VAP® .....	membrangestützte Vakuuminfusion (engl. Vacuum Assisted Process)
VARI.....	Vakuuminfusion (engl. Vacuum Assisted Resin Infusion)



# Nomenklatur

$A_k$ .....	Querschnittsfläche der Einzelschicht in mm <sup>2</sup>
$b$ .....	Prüfkörperbreite in mm
$D$ .....	Federsteifigkeit in N/m
$\Delta_{NF}$ .....	Parallelverschiebung der neutralen Faser zur Querschnittsmitte in mm
$E$ .....	E-Modul in MPa
$E_{\parallel,\perp}$ .....	E-Modul in Faserrichtung und quer zu dieser (Gewebestruktur) in MPa
$EI$ .....	Biegesteifigkeit in Nmm <sup>2</sup>
$EI_0$ .....	Biegesteifigkeit (initial/1. Lastspiel) in Nmm <sup>2</sup>
$EI_D$ .....	Betriebsbiegesteifigkeit in Nmm <sup>2</sup>
$EI_D/EI_0$ .....	prozentuale Betriebsbiegesteifigkeit in %
$\varepsilon$ .....	Dehnung in %
$\varepsilon_f$ .....	Randfaserdehnung in %
$F$ .....	Kraft in N
$F_L$ .....	Laufgrad in -
$F_{mitt}$ .....	mittlere Trennkraft je Probenbreite in N
$F_{mitt_{100}}$ .....	mittlere Trennkraft je 100 mm Breite in N
$g$ .....	Erdbeschleunigung in m/s <sup>2</sup>
$G$ .....	Schubmodul in MPa
$G_{\parallel,\perp}$ .....	Schubmodul quer zu beiden Hauptfaserrichtungen der Gewebestruktur in MPa
$h$ .....	Prüfkörperdicke in mm
$h_k$ .....	Dicke der Einzelschicht in mm
$I_k$ .....	Flächenträgheitsmoment der Einzelschicht in mm <sup>4</sup>
$l$ .....	Prüfkörperlänge in mm
$L$ .....	Stützweite in mm
$k$ .....	Einzelschicht des Laminataufbaus
$m$ .....	Masse in g
$m_A$ .....	Flächengewicht in g/m <sup>2</sup>
$M_B$ .....	Biegemoment in Nm
$n$ .....	Stichprobenzahl in -
$n_D$ .....	Anzahl der Daten in -
$n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$ .....	Anzahl Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von $(\pm 45)^\circ$ in -
$n_{ET222 (0/90)^\circ}$ .....	Anzahl Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von $(0/90)^\circ$ in -

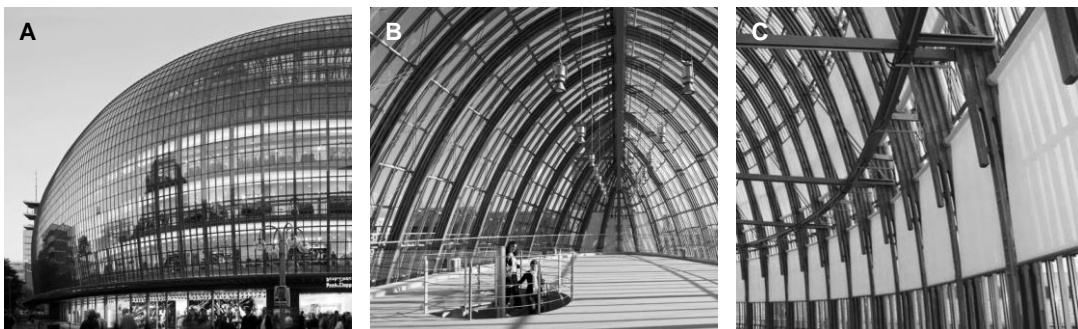
$n_F$	.....	Anzahl der Faktoren in -
$N$	.....	Lastspielzahl in -
$N_B$	.....	Lastspiel Bruchversagen in -
$N_D$	.....	Lastspiel Betriebsfestigkeit in -
$p$	.....	Druck in bar
$r$	.....	Radius in mm
$R_{\parallel, \perp}$	.....	Zugfestigkeit in Faserrichtung und quer zu dieser (Gewebestruktur) in MPa
$R_{\perp \perp}$	.....	Zugfestigkeit quer zu beiden Hauptfaserrichtungen der Gewebestruktur in MPa
$R^2$	.....	Bestimmtheitsmaß in -
$R^2_{korr}$	.....	korrigiertes Bestimmtheitsmaß in -
$\sigma_Z$	.....	Zugspannung in MPa
$\sigma_{ZR}$	.....	Restzugfestigkeit in MPa
$\sigma_{ZR}/\sigma_Z$	.....	prozentuale Restzugfestigkeit in %
$\sigma_b$	.....	Biegespannung in MPa
$\sigma_{b0}$	.....	Biegespannung (initial/1. Lastspiel) in MPa
$\sigma_{bD}$	.....	Biegespannung (Betriebsfestigkeit) in MPa
$\sigma_{bD}/\sigma_{b0}$	.....	prozentuale Biegespannung bei Betriebsfestigkeit in %
$SSE$	.....	durch Regression erklärte Quadratsumme in -
$SST$	.....	Quadratsumme der Datenbasis in -
$t$	.....	Zeit in s
$T$	.....	Temperatur in °C
$T_g$	.....	Glasübergangstemperatur in °C
$v$	.....	Geschwindigkeit in mm/min
$y_k$	.....	Steiner Anteil in mm

# 1. Einleitung und Motivation

Begründet durch die stetig wachsende Weltbevölkerung nimmt der Wohnungsbau zu und die Baubranche wächst [15, 106]. Auf den Betrieb heutiger Gebäude entfallen bereits ca. 40 bis 50 % des Energieverbrauchs [47, 48]. Hauptverantwortlich dafür ist die Temperierung von Gebäuden mittels Klimaanlage, durch die die Raumtemperatur trotz Sonneneinstrahlung möglichst konstant gehalten werden soll. In aktuellen Studien wird gezeigt, dass für das Kühlen im Sommer nahezu ebenso viel Energie verbraucht wird wie für das Heizen im Winter. Durch ein stufenlos einstellbares, außen liegendes Verschattungssystem kann der Energiebedarf von Gebäuden drastisch gesenkt werden [9, 75]. Die Studien gehen allein für Europa von einer Reduktion von etwa 41 Mio. Tonnen Öl (10 %) und rund 111 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr aus [54, 105].

Darüber hinaus ist ein Großteil aller Rohstoffe, ca. 60 % [47, 48], in Gebäuden gebunden. Das Streben, den Verbrauch endlicher Ressourcen wie beispielsweise Beton beim Gebäudebau zu reduzieren, führt vermehrt zu großen Glasfassaden in modernen Bauten. Des Weiteren ermöglichen neue Fertigungstechnologien den Bau von komplex gekrümmten Fassaden, deren Verschattung eine Herausforderung darstellt: Eine Vielzahl kleinteiliger Verschattungselemente wird über mechanische Gelenke miteinander verbunden und einzeln angesteuert. Diese Komplexität führt zu wartungsintensiven Konstruktionen, in der mechanische Gelenke die Schwachstelle des Gesamtsystems darstellen. [1, 13, 60, 64, 90]

Ein Beispiel der beschriebenen modernen Architektur ist das 2005 erbaute Peek & Cloppenburg Kaufhaus in Köln (vgl. Abb. 1.1). Die doppelt gekrümmte Fassade wird innen liegend verschattet, wodurch der Wirkungsgrad der Verschattung reduziert und der Energieverbrauch des Gebäudes erhöht wird. Eine energieeffiziente Verschattung kann nur gewährleistet werden, wenn innen liegende Systeme, wie in der Detailansicht Abb. 1.1C dargestellt, durch ein robustes, außen liegendes System ersetzt werden.



**Abb. 1.1** Beispiel einer doppelt gekrümmten Außenfassade mit komplexer innen liegender Verschattung: Kaufhaus Peek & Cloppenburg, Köln, Deutschland (Architekt: Renzo Piano Building Workshop Paris); **A** Doppelt gekrümmte Außenfassade [57], **B** Innenansicht Kuppel [57], **C** Komplexes innen liegendes Verschattungssystem [18].

Ein außen liegendes Verschattungssystem darf durch Witterungs- und andere Umgebungseinflüsse nicht in seiner Funktionalität beeinträchtigt werden. Durch die Substitution der herkömmlich verwendeten Starrkörpersysteme bzw. der mechanischen Gelenke mit nachgiebigen Mechanismen, kann dieses Ziel erreicht werden. Die Vorteile nachgiebiger Mechanismen sind neben geringem Verschleiß und hoher Betriebsfestigkeit ebenso die Reduktion der Elementanzahl und die einfache Montage [46, 51, 71]. Allerdings steht die Flexibilität und Adaptivität des Gesamtsystems im Widerspruch zur Robustheit gegenüber äußeren Einflüssen [55, 72]. In dem für die Architektur relevanten und nutzbaren Maßstab spielt dieser Faktor eine entscheidende Rolle: Das Material des Gelenkbereichs muss nicht nur flexibel, sondern ebenso lasttragend sein [13, 73].

Das Gewicht der beweglichen Teile lässt sich durch den Einsatz von Leichtbaumaterialien verringern [44]. Ziel ist es, die Last, die auf den nachgiebigen Bereich wirkt, zu reduzieren, ohne die Steifigkeit der beweglichen Flächen zu verringern. Faserverbundkunststoffe sind aufgrund ihrer hohen gewichtsspezifischen Festigkeit und Steifigkeit [101] für diesen Einsatzzweck sehr gut geeignet. Die Verwendung für adaptive Bauteile ist jedoch bisher nur in begrenztem Maß möglich und wenig etabliert. Es mangelt nicht nur an Kenntnissen über die technologischen Zusammenhänge in lokal nachgiebigen Faserverbundbauteilen, sondern ebenso an Materialansätzen, die die technische Umsetzung ermöglichen. Bekannte Faserverbundbauteile mit lokalen Gelenken bestehen meist aus zwei steifen Faserverbundkomponenten, die durch Metall- oder Kunststoffscharniere, die mit dem Faserverbund verklebt oder verschraubt werden müssen, miteinander verbunden werden. Diese Verbindung ist eine Schwachstelle im Material bzw. Bauteil und führt darüber hinaus, insbesondere bei der Verwendung von Metall, zu zusätzlichem Gewicht und hohen Herstellungskosten [17, 79]. Überdies besteht die Möglichkeit, nachgiebige Gelenke aus Thermoplast zu verwenden, um zwei Faserverbundkunststoffbauteile miteinander zu verbinden. Nachteilig ist dabei die schlechte Haftung des Thermoplasts zu dem oft für steife Bauteile verwendeten Duroplast. Dementsprechend müssen wie bei Scharnieren herkömmliche Verbindungstechniken mit den bereits genannten Nachteilen angewandt werden [17].

Eine beispielhafte Umsetzung einer adaptiven Struktur aus Faserverbundkunststoff, allerdings ohne nachgiebige Gelenke, aber auf homogener Materialbasis, ist der *flectofin*<sup>®</sup>. Das Bewegungsprinzip beruht auf einem in der Technik bekannten Versagensmechanismus, dem Biegedrillknicken [103]. Es wurde von der Bewegung der *Strelitzia Reginae* bzw. den am Pollenstab befestigten Lamellen inspiriert. Eine technisch relevante und industriell umsetzbare Lösung stellt der *flectofin*<sup>®</sup> jedoch nicht dar: Die nahezu homogene Steifigkeit in dem Epoxidharz-basierten Faserverbundkunststoff führt zu hohen Aktuierungskräften und hohen Beanspruchungen im Material. Das Material der Lamellen versagt infolgedessen nach wenigen Lastspielen. [12, 66–69, 87, 99]



Für industriell umsetzbare, lasttragende Gelenke mit hoher Betriebsfestigkeit muss folglich ein Material definiert werden, mit dem sich sowohl steife als auch flexible Bauteilbereiche abbilden lassen. Beide Bereiche sollten nicht aus unterschiedlichen Materialien bestehen, um eine Bauteilchwachstelle durch Fügstellen auszuschließen. Faserverbundkunststoffe sind aufgrund ihrer integralen Bauweise und der Möglichkeit die Anisotropie der Materialeigenschaften entsprechend zu nutzen für diesen Zweck prinzipiell geeignet. In diversen Patentschriften sind Materialansätze erläutert, die die Möglichkeit der Integration lokaler Nachgiebigkeit zeigen. Das Gewicht großskalierter Bauteile können die meisten, zum Teil aufgrund von quer zur Belastungsachse orientierten Fasern, allerdings nicht tragen. Bei einem solchen Laminataufbau würde nur das Matrixsystem bzw. die Grenzschicht zwischen Fasern und Matrix auf Zug belastet. Bei anderen Materialansätzen liegen die Fasern im Gelenkbereich nicht imprägniert vor, so dass sie weder die erforderliche Festigkeit noch die notwendige Beständigkeit gegenüber äußeren Witterungseinflüssen besitzen. [13, 17, 63, 70, 77, 88]

Malia et. al (2015) beschreiben im Gegensatz dazu ein faserverstärktes Gelenk, das aufgrund der Kombination von Faserverbundkunststoff und Elastomer eine hohe Betriebsfestigkeit und zugleich lasttragende Eigenschaften bei nahezu uneingeschränktem Biegewinkel besitzt [77]. Dieser Ansatz wird durch weitere Patentschriften der Fa. Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG gestützt [92, 93, 108]. Allerdings ist dieser Materialansatz wissenschaftlich unerforscht, so dass keine Kenntnisse über die technische Umsetzbarkeit eines solchen Gelenkbauteils vorliegen.

Hier setzt das Ziel dieser Arbeit an: Durch die Entwicklung einer Methodik zur Umsetzung der in Malia et. al (2015) [77] beschriebenen Materialkombination in FVK-Gelenkbauteile, kann der Transfer in ein adaptives Fassadenbauteil gewährleistet und folglich ein wartungsarmes, stufenlos einstellbares Verschattungssystem zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden bereitgestellt werden. Dabei sind die Anforderungskriterien, die an ein Fassadenbauteil gestellt werden, bspw. Witterungsbeständigkeit und ein Brandverhalten entsprechend der Baustoffklasse B2, zu berücksichtigen. Darüber hinaus gilt es neben dem Material ebenso die Gestaltungsparameter eines FVK-Gelenkbauteils zu untersuchen und in einen mathematischen Kontext zu setzen. Dadurch soll eine effiziente Auslegung eines FVK-Gelenkbauteils ohne umfangreiche Prüfungen ermöglicht werden. Unter Vorgabe der notwendigen Restzugfestigkeit nach einer definierten Anzahl Lastspiele sollen Materialaufbau und Geometrie des FVK-Gelenkbauteils festgelegt werden können und die mechanischen Eigenschaften abschätzbar sein.

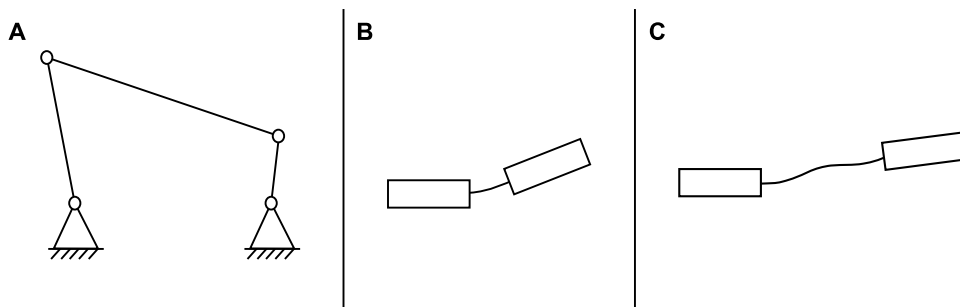


## 2. Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.1 Starrkörper- und Nachgiebigkeitsmechanismen

Getriebe oder Mechanismen sind „Einrichtungen zum Umformen oder Übertragen von Bewegungen und Kräften und damit auch von Energie. Ein Getriebe besteht aus wenigstens drei gegeneinander beweglichen Gliedern“ [107, S. 3]. Herkömmliche Getriebe bestehen aus Starrkörperelementen, die über mechanische Gelenke miteinander verbunden sind (vgl. Abb. 2.1A). Abhängig von der Anzahl der mechanischen Gelenke, ihrer Freiheitsgrade und der Lagerung des Mechanismus ist eine unterschiedliche Anzahl Relativbewegungen bzw. Relativlagen der Stellglieder zueinander möglich. Der Laufgrad ( $F_L$ ) eines Getriebes spiegelt diese Anzahl wider. Unter Berücksichtigung der erforderlichen resultierenden Bewegung oder des notwendigen Kraftübertrages können bei der Auslegung eines solchen Starrkörpergetriebes Kinematik, Kinetik und Festigkeit unabhängig voneinander betrachtet werden. [51, 81, 107]

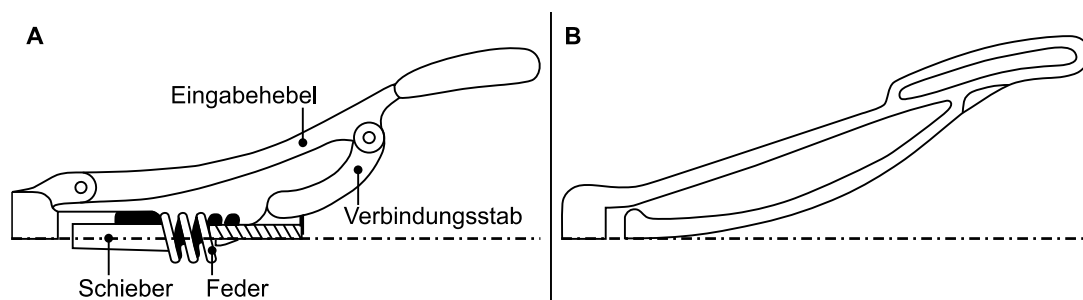
Ebene Mechanismen, wie in Abb. 2.1A dargestellt, erfordern keine mechanischen Gelenke. Sie können ebenso durch die Implementierung nachgiebiger Mechanismen an den rotatorischen, ebenen Verbindungspunkten abgebildet werden. Nachgiebige Mechanismen entstehen durch die Verbindung zweier steifer Elemente durch einen nachgiebigen, flexibel verformbaren Bereich. Dabei kann zwischen lokalen Gelenken und einer langen flexiblen Verbindung unterschieden werden (vgl. Abb. 2.1B und C).



**Abb. 2.1 Starrkörper- und Nachgiebigkeitsmechanismen; A** Ebenes Getriebe mit Laufgrad  $F_L=1$ ; **B** Nachgiebiges lokales Gelenk nach [71]; **C** Lange flexible Verbindung nach [71].

Das geläufigste Beispiel für nachgiebige Mechanismen und lokale Gelenke sind herkömmliche Faltsysteme von Verpackungen und Verschlüssen: Hier wird meist durch Dünnstellen eine lokale Nachgiebigkeit erzeugt. Darüber hinaus können, bspw. in Greifer- und Klemmsystemen, mechanische Gelenke durch nachgiebige Mechanismen ersetzt werden. Abhängig von der notwendigen Verformbarkeit werden sowohl lokale Gelenke in Bereichen größerer Verformung als auch lange flexible Verbindungen für geringere Verformungen über eine längere Distanz genutzt. In Abb. 2.2A ist der Aufbau einer Crimpzange, deren

Verformung auf der Verbindung von Starrkörpern mit mechanischen Gelenken beruht, und ihr Gegenstück auf Basis von nachgiebigen Mechanismen (vgl. Abb. 2.2B) gezeigt.



**Abb. 2.2 Substitution mechanischer Gelenke durch nachgiebige Mechanismen am Beispiel einer von AMP Inc. entwickelten Crimpzange** (aufgrund der Symmetrie ist nur der halbe Mechanismus der Zange gezeigt) in Anlehnung an [50]; **A** Crimpzange mit mechanischen Gelenken, **B** Crimpzange mit nachgiebigen Mechanismen.

Bewegung und Kraft werden in einem nachgiebigen Mechanismus ausschließlich durch strukturelle Verformung übertragen. Die strikte Trennung von Kinematik, Kinetik und Festigkeit ist bei der Auslegung von nachgiebigen Mechanismen nicht möglich. Werden sie in ein Getriebe eingebunden, hängt die Verformung des gesamten Getriebes von der Richtung der eingetragenen Kräfte ab, so dass Kinematik und Kinetik des Mechanismus nicht klar voneinander zu trennen sind. Für die Auslegung solcher Mechanismen wird daher auf ein „Pseudo-Rigid-Body Model“ zurückgegriffen. Dabei werden gleichartige, steife Elemente über mechanische Gelenke und Federmechanismen miteinander verbunden. Die Federelemente lassen eine Abschätzung der Bewegung und Kräfte für einen nachgiebigen Mechanismus zu. Die lokale Verformung in den Gelenken lässt sich über das Flächenträgheitsmoment und die Biegesteifigkeit des Materials berechnen. [51, 71, 80, 81, 109]

Der Ersatz von steifen, mechanischen Gelenken durch nachgiebige, lokale Gelenke (Abb. 2.1B) bringt diverse Vorteile mit sich, so dass die Industrie bestrebt ist, Lösungen mit nachgiebigen statt mechanischen Gelenken zu implementieren. Zu den Vorteilen gehört neben der Kraftübertragung ohne Reibungsverluste und dem Verzicht auf Schmierungen die Möglichkeit der kompakten, wartungsarmen Bauweise von Getrieben. Überdies wird die Anzahl der Elemente in einem Mechanismus reduziert und dadurch auch die Komplexität. Dies führt wiederum zu geringerer Wartungsintensität. Hinzu kommt die geräuscharme Bewegung und einfache Montage sowie die Möglichkeit die durch die Verformung im nachgiebigen Bereich gespeicherte Energie für das Rückstellen in die Ausgangsposition, ähnlich einer Feder, zu nutzen. [45, 46, 51, 71, 81]

Eine Herausforderung stellt allerdings die erforderliche hohe Betriebsfestigkeit des nachgiebigen Bereichs unter Berücksichtigung der zyklischen Beanspruchung dar. Gelenkbauteile können durch Langzeitbelastung Kriechen oder Spannungsrelaxationen unter-

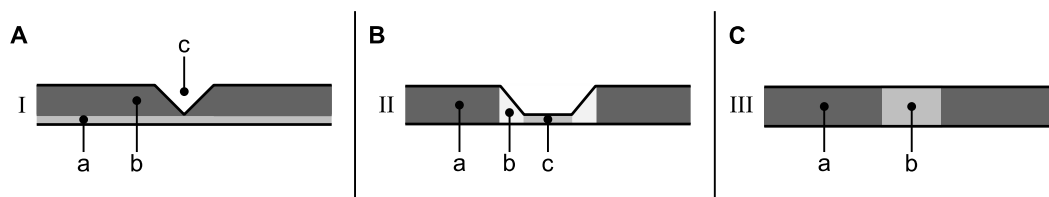
liegen, so dass die tatsächliche Verformung nicht länger der erforderlichen entspricht. Das Kriechen des Materials kann ebenso als unerwünschter Effekt, abhängig von den Temperaturbedingungen, denen das Material im Anwendungsfall ausgesetzt ist, auftreten. Somit gilt es nicht nur die Bewegungsmechanismen von nachgiebigen Mechanismen, sondern gleichermaßen die Materialeigenschaften im Hinblick auf die klimatischen Konditionen des Anwendungsfalls zu berücksichtigen. [44–46, 51–53, 69, 71, 81]

## 2.2 Faserverstärkte Gelenke

Aufgrund der anisotropen Materialeigenschaften, der Möglichkeit der integralen Bauweise und des geringen Gewichts bei gleichzeitig hoher gewichtsspezifischer Festigkeit ist Faser-verbundkunststoff (FVK) für die Herstellung von lokalen Gelenken zur Anwendung in großskalierten, architektonischen Bauteilen sehr gut geeignet. Gelenke, die in ein adaptives Verschattungsbauteil implementiert werden, müssen nicht nur nachgiebig, sondern ebenso lasttragend sein [55, 72]. Somit sind unverstärkte Kunststoffscharniere, wie sie bereits in Serie im Spritzguss meist aus thermoplastischem Kunststoff hergestellt werden, in diesem Anwendungsfall nicht geeignet. Sie würden unter Last kriechen [41, 101].

Für die Herstellung lokaler Gelenke mit FVK existieren unterschiedliche Materialansätze: Zum einen können sie aus Fremdmaterialien wie Metallen oder flexiblen Kunststoffen, die über Klebe- und Schraubverbindungen an den FVK angebunden werden, hergestellt werden. Zum anderen können sie ebenso stoffhomogen aus einem FVK, der sowohl steife als auch flexible Materialeigenschaften besitzen kann, gefertigt werden. Die Einbindung von Fremdmaterialien bringt nicht nur eine lokale Schwachstelle in das Material ein, sondern, im Fall der Verwendung von metallischen Werkstoffen, auch zusätzliches Gewicht im Vergleich zu der Verwendung von Kunststoffen. Eine Leichtbaulösung für großskalierte Bauteile aus FVK ist dementsprechend nur umsetzbar, wenn das lokale, nachgiebige Gelenk aus dem gleichen Material hergestellt wird wie das steife, bewegte Element. [5, 13, 17, 45, 46, 53, 79, 81, 82]

In diversen Patentschriften werden unterschiedliche Materialansätze für ein materialhomogenes FVK-Gelenk dargestellt [16, 17, 63, 70, 77–79, 88, 92]. Es kann zwischen drei Ansätzen unterschieden werden, die in Abb. 2.3 schematisch dargestellt sind. Die Flexibilität kann durch (I) mechanische Nachbearbeitung und eine Dünnstelle oder (II) durch biege- weiche Faserverstärkung bzw. niedrigmoduliges Matrixmaterial im Gelenkbereich oder (III) ausschließlich durch ein flexibles Matrixmaterial im Gelenkbereich unterschiedlich zu dem im Bauteil verwendeten Matrixmaterial hergestellt werden. Die drei Materialansätze werden nachfolgend näher beschrieben.



**Abb. 2.3 Querschnittsdarstellung der Materialansätze zur Herstellung von FVK-Gelenkbauteilen ; A** Materialansatz (I): mechanische Nachbearbeitung mit (a) Gelenkschicht aus AFK, (b) versteifender Schicht aus GFK oder CFK und (c) Fräsnut, **B** Materialansatz (II): biege- weiche Faserverstärkung oder niedrigmoduliges Matrixmaterial im Gelenkbereich mit (a) versteifendem Bauteilbereich aus GFK oder CFK, (b) gradiertem Materialübergang und (c) Gelenkbereich aus flexiblem Fasermaterial oder Dünnstelle, **C** Materialansatz (III): biege- weiches Matrixmaterial unterschiedlich zu Matrixmaterial im steifen Bauteilbereich mit (a) steifem Bauteilbereich aus GFK oder CFK mit hochmoduligem Matrixmaterial und (b) Gelenkbereich bestehend aus Fasern imprägniert mit Elastomer oder Silikon.

Sofern der Ansatz (I) verfolgt wird, ist eine Schicht des Faserverbundkunststoffs, die den Gelenkbereich bildet, sich aber über das gesamte FVK-Gelenkbauteil erstreckt, meist aus aramidfaserverstärktem Kunststoff (AFK) hergestellt. Aramidfasern weisen im Vergleich zu Glas- und Carbonfasern eine relativ hohe Dehnung (ca. 2 bis 3,3 % [42]) auf. Daher können Biegebewegungen mit diesem Material verhältnismäßig gut umgesetzt werden. Im angrenzenden steifen Bauteilbereich werden meist Glas- oder Carbonfasern eingesetzt. Der Aufbau wird vollständig mit einem Matrixsystem, vorzugsweise Epoxidharz, imprägniert. Nach dem vollständigen Vernetzen wird für den Gelenkbereich eine Nut in den FVK gefräst und/oder das Bauteil aufgeknickt, so dass sich die Matrix zum Teil von den Aramidfasern löst. Ferner besteht die Möglichkeit mittels Laser einen höheren Anteil des Matrixmaterials im Gelenkbereich zu entfernen. Durch die geringe UV-Stabilität von Aramidfasern [42, 101] ist dieser Materialansatz jedoch nicht für Außenanwendungen geeignet. Darüber hinaus ist der Biegeradius durch die Fräsnut eingeschränkt, und bereits in Priegelmaier und Heilmeyer (2007) wird beschrieben, dass sich solche Gelenke lediglich für eine geringe Anzahl an Lastspielen eignen [88]. Des Weiteren ist der mehrstufige Herstellungsprozess relativ aufwändig und entspricht nicht dem angestrebten einstufigen Fertigungsansatz für nachgiebige Mechanismen. Es ist außerdem anzunehmen, dass die lasttragenden Eigenschaften, aufgrund der unvollständigen Imprägnierung der Fasern im Gelenkbereich, bereits reduziert sind. [44, 63, 70, 88]

Ansatz (II) sieht ebenfalls eine Dünnstelle im Material vor. Jedoch werden hier, neben Glas- und Carbonfasern, Mikrofasern oder Leder als Verstärkungsmaterial für den Gelenkbereich des FVK-Gelenkbauteils vorgesehen. Das gesamte FVK-Gelenkbauteil, dessen bewegte Flächen mit einem Kernmaterial oder carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) versteift werden, wird mit einem flexiblen Epoxidharz imprägniert [16, 79]. Dieser Materialansatz wird für die wissenschaftlichen Untersuchungen von nachgiebigen Mechanismen, die durch Formgedächtnislegierungen aktuiert werden, an der Technischen Uni-

versität Dresden verfolgt. Die untersuchten Gelenke bestehen aus CFK oder glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit Gelenkbreiten von 50 bis 150 mm. Für die Imprägnierung werden ein Epoxid-Infusionsharz und -härter der Fa. Hexion (MGST<sup>TM</sup> RIMR 135 und MGST<sup>TM</sup> RIMH 134 – RIMH 137) verwendet. Auf die Gelenke werden mittels Tailored Fiber Placement Formgedächtnislegierungen aufgebracht, die durch Wärmeeintrag die Bewegung des Gelenkbauteils aktiveren. Die Untersuchungen zeigen eine relativ hohe Steifigkeit bei gleichzeitig verhältnismäßig geringen Deformationen, die mit diesem Materialansatz abbildbar sind. Es werden maximale Auslenkungen von 70 mm [7] am Ende eines Prüfkörpers mit einer Gesamtlänge von 240 mm bzw. ein maximaler Auslenkungswinkel von 16° beschrieben. [3–7]

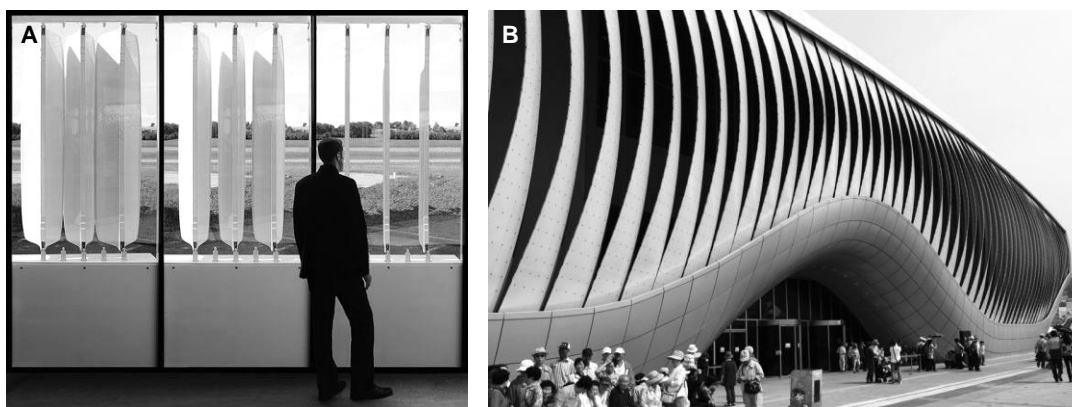
Darüber hinaus ist in Patentschriften Materialansatz (III) (vgl. Abb. 2.3C) zu finden. Hier werden die Fasern im Gelenkbereich vor der Imprägnierung mit dem duromeren Matrixsystem geschützt, indem sie von thermoplastischem oder duroplastischem Elastomer bzw. Silikon umhüllt werden. Die Versteifung der bewegten Bauteilflächen ergibt sich durch die Platzierung von steifem FVK in diesen Bauteilbereichen. Die Verbindung von FVK und Elastomer wird von dem Hersteller Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG in Schaub et al. (2012) ausführlich beschrieben [92]. Ein auf diesem Weg hergestelltes FVK-Gelenkbauteil soll nicht nur einen uneingeschränkten Biegewinkel, sondern auch eine nahezu uneingeschränkte Betriebsfestigkeit besitzen. [17, 77, 78, 92, 93, 108]

Wissenschaftliche Untersuchungen liegen zu Materialansatz (III) bisher nicht vor. Es gibt keine Kenntnisse über die tatsächlich anzuwendenden Materialien, ihre Kompatibilität untereinander oder die mechanischen Zusammenhänge in einem FVK-Gelenkbauteil mit Elastomer, Faserverstärkung und thermoplastischer bzw. duroplastischer Matrix.

## 2.3 Adaptive Fassadenverschattungen aus Faserverbundkunststoff

Im Bauwesen kann unterschieden werden zwischen statischen und adaptiven Fassaden. Statische Fassaden, in denen häufig GFK zum Einsatz kommt, können einer konstanten Verschattung des Gebäudeinneren dienen, meist ist die Funktion jedoch ausschließlich die dekorative Verkleidung der Fassade. Adaptive Fassaden erfüllen dagegen, neben dem architektonisch gestalterischen Aspekt, hauptsächlich den Zweck der Anpassung an sich ändernde Umweltbedingungen. Es kann dabei unterschieden werden zwischen adaptiven Verschattungen aus biegeschlaffen Textilien, die bspw. bei der Überdachung von Stadien Anwendung finden, und Verschattungen aus biegesteifen Materialien. Die Bewegung innerhalb der adaptiven Systeme wird überwiegend durch Gelenkkinematiken und Starrkörperbewegungen, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, umgesetzt. [61, 69, 74, 85, 95, 96]

Konstruktionen aus biegeschlaffen Materialien erlauben im Vergleich zu Starrkörperkonstruktionen keine stabilen Zwischenzustände. Um den Wirkungsgrad eines Verschattungssystems optimal auszunutzen und die Energieeffizienz eines Gebäudes infolge der Verschattung bestmöglich zu steigern, sind diese allerdings zwingend notwendig. Dementsprechend ist es sinnvoll, nachgiebige Strukturen, die eine stufenlose Verformung zulassen als Verschattungssysteme zu verwenden. In Douthe et al. (2007) und Lienhard et al. (2015) wird auf die allgemeinen Vorteile, die eine Verwendung von FVK im Bauwesen, verglichen mit Stahl und Holz hat, hingewiesen [37, 69]. Bisher sind lediglich zwei großskaliert umgesetzte, adaptive, stufenlos einstellbare Fassadenverschattungen aus FVK, deren Bewegung auf der Nachgiebigkeit des Materials basiert, bekannt: Zum einen wurde der flectofin<sup>®</sup> (vgl. Abb. 2.4A), eine Doppellamellenstruktur, und zum anderen der Expo Pavillon 2012 „One Ocean“, eine Einzellamellenstruktur, technisch umgesetzt (vgl. Abb. 2.4B). [10, 13, 59, 69, 74, 83, 86, 87, 97–99, 104]



**Abb. 2.4 Adaptive Fassadenverschattungen aus FVK;**

**A** Funktionsdemonstrator des flectofin<sup>®</sup> mit verschiedenen Öffnungsgraden [69], **B** Fassade des „One Ocean“ Themenpavillons bei der EXPO 2012, Yeosu, Südkorea [104].

Das Bewegungsprinzip beider Materialien ist biologisch inspiriert. In Loonen (2015), Nachtigall und Pohl (2013), Knippers und Speck (2011) sowie Schleicher (2015) wird auf die Eignung biologischer Vorbilder und die Übertragung ihrer nachgiebigen Bewegungsprinzipien in technische Anwendungen hingewiesen [59, 74, 83, 100]. Das biologische Vorbild des flectofin<sup>®</sup> ist die Paradiesvogelblume *Strelitzia Reginae*: Beim Bestäubungsvorgang landet ein Vogel auf dem Blütenstab der Blume, an dem zwei Lamellen befestigt sind, die die Bestäubungsorgane der Pflanze umschließen und schützen. Das steife Rückgrat des Stabes wird durchgebogen, die Lamellen klappen um und die Bestäubungsorgane liegen frei. Die Pollen bleiben an dem Gefieder des Vogels haften und werden zur nächsten Pflanze weitergetragen. Die Doppellamellenstruktur flectofin<sup>®</sup> besteht aus GFK, genauer einem pultrudierten, steifen Rückgrat und zwei separat voneinander, im Vakuuminfusionsprozess, hergestellten GFK-Lamellen. Die drei Teile werden miteinander verklebt und die Bewegung der Lamellen durch eine Stauchung des Rückgrats erzeugt. Durch die Stauchung



biegt sich das Rückgrat durch und die Lamellen klappen um. Der GFK der Lamellen besteht aus hierarchisch geschichtetem Glasfasergewebe, imprägniert mit Epoxidharz. Die oberen Enden der Lamellen sind mit Glasfaser-Schmalgewebe zusätzlich versteift, um die Welligkeit des Materials beim Umklappen zu reduzieren. An den Kräfteintragungspunkten sind zusätzliche Einzelrovings integriert, die eine homogenere Kraftverteilung beim Lasteintrag gewährleisten sollen. Das Rückgrat ist 2 m lang und die Breite der Lamellen beträgt 0,25 m. [59, 65–67, 86, 99, 104]

Die 180 leicht gebogenen Einzellamellen aus GFK, die den Expo Pavillon „One Ocean“ in Yeosu, Südkorea verschatten, sind deutlich größer: Bei einer Dicke von max. 9 mm sind sie 3 bis 14 m lang und 1,25 m breit. Ihr Bewegungsprinzip ist nicht direkt aus der Biologie abgeleitet, dennoch ist das zugrunde liegende Prinzip aus Beobachtungen von Pflanzenbewegungen inspiriert. Die Lamellen sind oben und unten an jeweils einer Ecke schwenkbar gelagert, an den anderen beiden Ecken wird eine geringe Druckkraft eingeleitet, die zu einem kontrollierten Durchknicken führt. Im Vergleich zum flectofin<sup>®</sup> ist kein vollständiges Öffnen der Fassade möglich. Allerdings sind die Beanspruchungen im Material deutlich reduziert. [58, 59, 69, 104]

Die zwei beschriebenen Beispiele zeigen, dass nachgiebige Strukturen aus FVK umsetzbar sind. Dennoch beschreiben die beteiligten Wissenschaftler eine unzureichende Betriebsfestigkeit und hohe Aktuierungskräfte, die zu hohen Beanspruchungen des Materials führen. Eine Möglichkeit die Beanspruchung des Materials zu reduzieren, ist die Integration lokal nachgiebiger Gelenke und die Verschattung einer Fassade durch Elemente mit Faltpattern. Bisher erfolgte zu diesem Forschungsansatz jedoch keine technische Umsetzung. [11–14, 69, 97, 100]

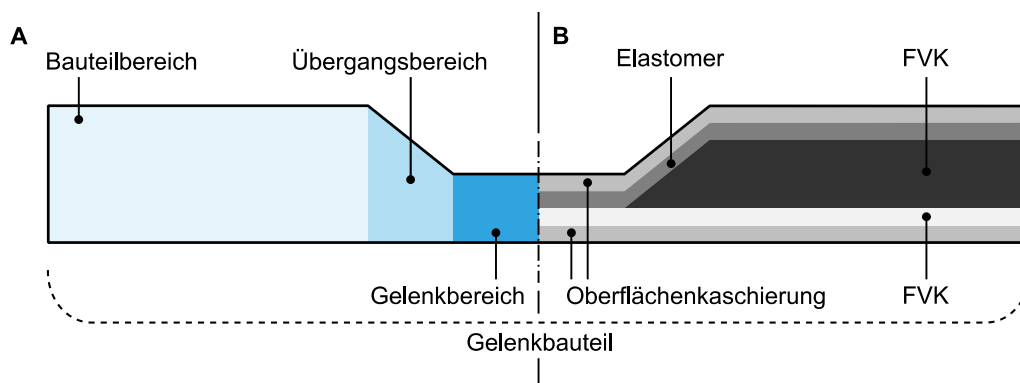


### 3. Zielsetzung, Arbeitshypothesen und Lösungsweg

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Grundlagenkenntnissen über Materialien und technologische Zusammenhänge für die Auslegung eines Hybridmaterials aus FVK und Elastomer für außen liegende, adaptive Fassadenbauteile. Dabei liegt der Fokus auf der Entwicklung eines Faserverbundmaterials und einer Methodik zur Auslegung von nachgiebigen Gelenkbauteilen bestehend aus diesem Material.

Ausgehend von dem in Kapitel 2.2 und 2.3 beschriebenen Stand der Technik wird deutlich, dass für großskalierte, adaptive Bauteile mit lokaler Nachgiebigkeit aus FVK, insbesondere für die Außenanwendung als Fassadenbauteil, keine wissenschaftlichen Untersuchungen zur technischen Umsetzbarkeit vorliegen. Für die Entwicklung eines Materials, das die Implementierung lokal nachgiebiger Gelenke, unter Berücksichtigung der Anforderungen an ein Fassadenbauteil, erlaubt, wird der in Kapitel 2.2 beschriebene Materialansatz (III), der eine Kombination aus Elastomer und FVK vorsieht [17, 77, 78, 92, 93, 108], verfolgt. Es ist davon auszugehen, dass mit diesem Ansatz ein Hybridmaterial entwickelt werden kann, das sowohl lasttragende, als auch adaptive Eigenschaften besitzt und eine ausreichend hohe Betriebsfestigkeit für den technischen Einsatz aufweist.

Zur Beschreibung der einzelnen Bereiche des zu entwickelnden Gelenkbauteils bzw. Materialaufbaus werden für diese Arbeit geltende Begrifflichkeiten, wie in Abb. 3.1A dargestellt, festgelegt. In Abb. 3.1B wird daneben der prinzipielle Aufbau eines FVK-Gelenkbauteils mit den verschiedenen Materialschichten des Hybridverbundmaterials nach Materialansatz (III) (vgl. Abb. 2.3C) gezeigt. Die Oberflächenkaschierung ist, abhängig von den ausgewählten Faser- und Matrixmaterialien, eine optionale Schicht.



**Abb. 3.1** Prinzipieller Aufbau eines FVK-Gelenkbauteils;

**A** Definition der Begrifflichkeiten für diese Arbeit (Bauteil-, Übergangs- und Gelenkbereich sowie Gelenkbauteil), **B** Prinzipieller Materialaufbau nach Materialansatz (III).

Für die Bearbeitung der gestellten Zielsetzung werden vier Arbeitshypothesen aufgestellt:

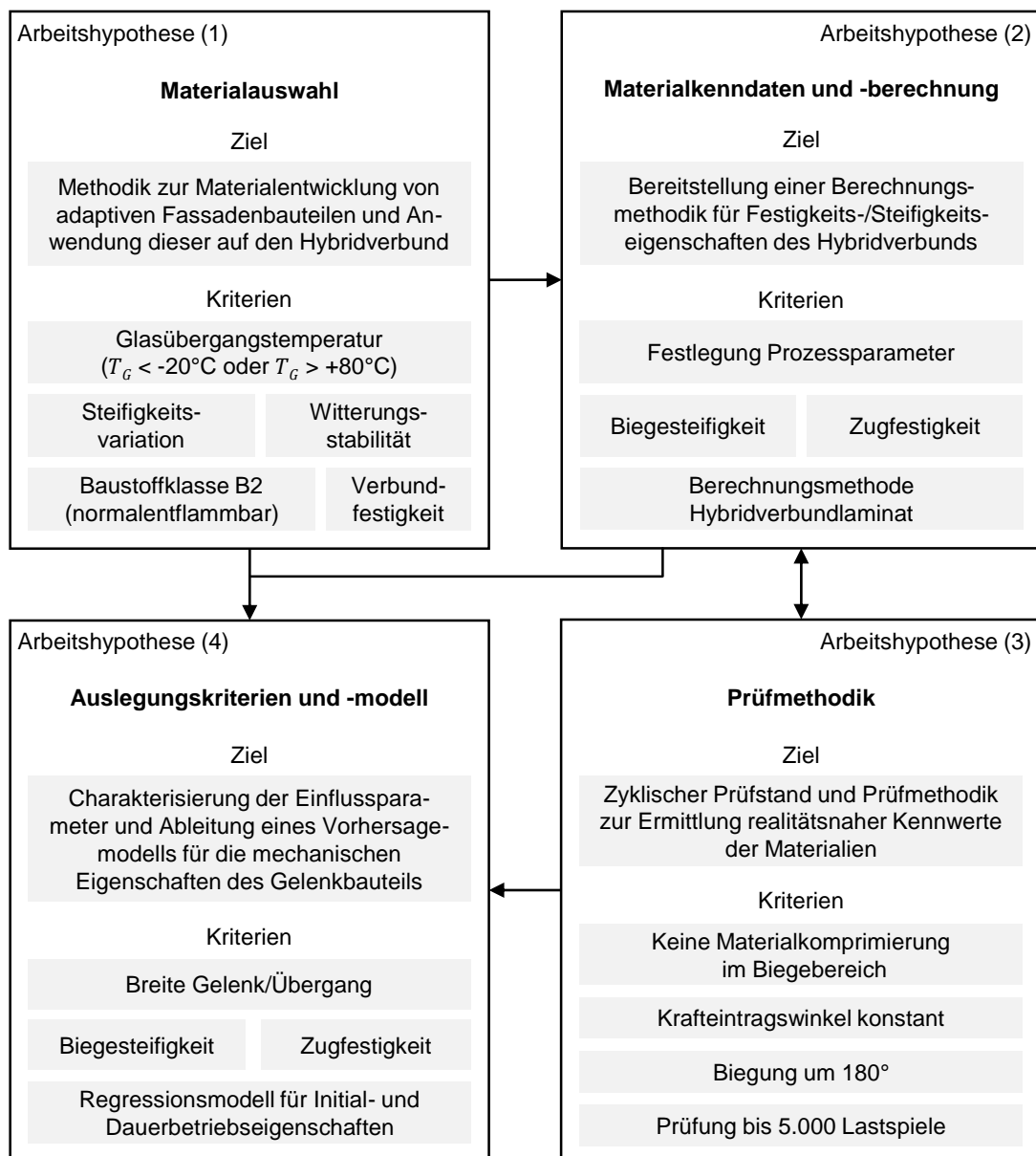
- (1) Durch die Kombination von Elastomer mit duroplastischem Faserverbundkunststoff kann ein Hybridmaterial hergestellt werden, das die Anforderungen an außen liegende Fassadenbauteile erfüllt.
- (2) Durch einen angepassten Laminataufbau im Gelenk- und Bauteilbereich kann die Steifigkeit und Festigkeit dieser Bereiche gezielt eingestellt und beeinflusst werden.
- (3) Durch die Entwicklung einer neuen Prüfmethodik für FVK-Gelenkbauteile können sowohl ihre Biegeeigenschaften als auch ihre Zugfestigkeit, nach einer definierten Anzahl Lastspiele, zur Auslegung von FVK-Gelenkbauteilen ermittelt werden.
- (4) Durch die Anpassung der äußeren Geometrie können die Beanspruchungen in den einzelnen Komponenten des FVK-Gelenkbauteils reduziert und somit die Lebensdauer erhöht werden.

Infolge der Überprüfung der vier Arbeitshypothesen ergeben sich für diese Arbeit vier Bearbeitungsfelder, die in Abb. 3.2 aufgezeigt werden. Ausgehend von Arbeitshypothese (1) gilt es verschiedene Materialien hinsichtlich ihrer Eignung für die Einzelschichten eines Hybridverbunds mit der Anwendung in einem Außenfassadenbauteil zu analysieren. Auf Basis der Ergebnisse der Einzelmaterialanalyse wird ein Materialverbund definiert, mit dem die notwendige Steifigkeitsvariation innerhalb eines FVK-Gelenkbauteils herstellbar ist. Eine Untersuchung des Materialverbunds im Gesamten stellt sicher, dass dieser eine gute Verbundfestigkeit zwischen den einzelnen Materialschichten aufweist und unter Bewitterung keinen Festigkeitsverlust erfährt. Darüber hinaus werden weitere Analysen durchgeführt, die gewährleisten, dass der Materialverbund die in DIN 18516-1:2010 [25] und DIN 4102-1:1998 [22] festgehaltenen Bestimmungen an die Brandschutzklasse (Baustoffklasse B2) und die Temperaturstabilität für ein Außenfassadenbauteil, d. h. eine Glasübergangstemperatur außerhalb der Temperatureinsatzgrenzen von  $-20\text{ °C}$  bis  $+80\text{ °C}$ , erfüllt. Die auf die Materialentwicklung anzuwendende Arbeitsmethodik ist auf weitere Materialentwicklungen für adaptive Fassadenbauteile direkt übertragbar.

Zur Abschätzung der Materialeigenschaften soll ferner eine Rechenmethodik ausgearbeitet und festgelegt werden, auf Basis derer die Abschätzung der Steifigkeits- und Festigkeitswerte abhängig vom Materialaufbau möglich ist. Für die Bearbeitung von Arbeitshypothese (2) müssen folglich die mechanischen Kennwerte der Einzelschichten unter Berücksichtigung des zu definierenden Herstellungsprozesses ermittelt werden. Mit diesen realitätsnahen Kennwerten sollen die mechanischen Eigenschaften vom Gelenk- und Bauteilbereich des Hybridverbundlaminates berechenbar sein.

Bisher bekannte Prüfverfahren ermöglichen keine Biegebewegung größer  $90^\circ$ . Auf ein adaptives Fassadenbauteil, dessen Bewegung auf Faltungsmustern beruht, müssen allerdings bis zu  $180^\circ$  applizierbar sein. Dementsprechend ist zur Betrachtung der mecha-

nischen Eigenschaften des Gelenkbauteils bei der Bearbeitung von Arbeitshypothese (3) die Entwicklung eines Prüfstands erforderlich, der einerseits die Biegung des Prüfkörpers um bis zu 180° erlaubt, andererseits keine Materialverformung durch den Kräfteintrag zulässt und zudem den Kräfteintrag unter konstantem Winkel gewährleistet. Neben dem Prüfstand muss auch eine Auswertungsmethodik für die Bestimmung relevanter mechanischer Kennwerte von FVK-Gelenkbauteilen erarbeitet und festgelegt werden.



**Abb. 3.2** Arbeitsfelder entsprechend der vier aufgestellten Arbeitshypothesen;

Zielsetzung der Arbeitsfelder, ihre Vernetzung untereinander und die bei der Bearbeitung zu berücksichtigenden Anforderungskriterien.

Die Validierung des zyklischen Prüfstands erfolgt durch mechanische Prüfungen zur Untersuchung von Arbeitshypothese (4): Der Steigerung der Lebensdauer durch Anpassung der Geometrie des FVK-Gelenkbauteils. Die Anforderung an die Betriebsfestigkeit eines Fas-

sadenbauteils wird entsprechend DIN EN 13561:2015 [31] bzw. DIN EN 13120:2014 [30] definiert. Die hier definierte Lebensdauerklasse 2 entspricht mit 5.000 Lastspielen einer Lebensdauer von ca. 10 Jahren. Für die Überprüfung von Arbeitshypothese (4) ist ein geeigneter Prüfplan mittels statistischer Versuchsplanung aufzustellen, der zugleich die Gelenkgeometrie und die unterschiedlichen Steifigkeiten im Gelenk- und Bauteilbereich adressiert. Basierend auf den Versuchsergebnisse wird ein Regressionsmodell erstellt, das die Abschätzung der mechanischen Kennwerte eines Gelenkbauteils im Langzeitbetrieb zulässt.

## 4. Materialien, Prozesse und Methoden

In den nachfolgenden Kapiteln werden alle in dieser Arbeit eingesetzten Materialien, Prozesse und Methoden vorgestellt. Für die Herstellungs- und Prüfmethode werden zudem die innerhalb dieser Arbeit angewandten Parameter definiert.

### 4.1 Materialien

Aufbauend auf den bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen zu nachgiebigen Mechanismen und adaptiven Fassadenverschattungen aus FVK, die in Kapitel 2.2 bzw. 2.3 beschrieben sind, werden die Matrixmaterialien für die Entwicklung eines Hybridverbunds, wie er in [11, 34, 35, 44, 45, 51] beschrieben ist, auf duromere Systeme begrenzt. Die Verarbeitungstechnologie ist im Vergleich zur Verarbeitung von Thermoplast kostengünstiger. Zudem kann sich die höhere Kriechneigung von Thermoplasten [41, 101] nachteilig auf die Betriebseigenschaften eines lasttragenden, nachgiebigen Mechanismus auswirken. Daneben werden als Fasermaterialien ausschließlich Kunststoff- und Glasfasern betrachtet. Es ist davon auszugehen, dass die Steifigkeit von Glasfasern für die Herstellung von Fassadenbauteilen ausreicht. Bei der Verwendung von Glasfasern entstehen überdies geringere Materialkosten als bei anderen Verstärkungsfasern, wie bspw. Kohlenstofffasern, so dass sie die wirtschaftlichere Wahl für eine Anwendung im Bauwesen sind [101]. Darüber hinaus findet GFK bereits in einer Vielzahl statischer Fassadenverkleidungen Anwendung und ist für diesen Einsatzzweck entsprechend etabliert [10]. Die untersuchten Kunststofffasern bestehen aus Polyamid und Polyester. Beide Materialien sind UV-stabil und weisen außerdem eine ausreichend hohe Temperaturstabilität für den Einsatz in einem Außenfassadenbauteil auf. Im Vergleich zu Glasfasern können durch die Verwendung von Kunststofffasern Lamine mit höherer Flexibilität hergestellt werden.

#### 4.1.1 Textile Flächengebilde

In Anlehnung an die in Kapitel 2.2 beschriebenen Materialien für den Materialansatz (III) werden Kunststofffaser- (Polyester und Polyamid) sowie Glasfasergewebe in die Untersuchung einbezogen. Die vier untersuchten Gewebe und ihre Kennung, die innerhalb dieser Arbeit verwendet wird, sind in Tab. 4.1 aufgeführt.

Ausgangsbasis für die Auswahl der Materialien ist das Glasgewebe (G\_GF), das für die im Stand der Technik beschriebene adaptive Fassadenverschattung flectofin<sup>®</sup> verwendet wurde. Es hat ein verhältnismäßig geringes Flächengewicht, wodurch die Steifigkeit in kleinen Abstufungen einstellbar ist. Die Gewebe aus Polyamid (G\_PA) und Polyester (G\_PET) wurden so gewählt, dass ein vergleichbares Flächengewicht vorhanden ist.

ET222 ist ein mit Epoxidharz vorimprägniertes Glasgewebe, sog. Prepreg, das vergleichend ausgewählt wurde, um neue Prozessmöglichkeiten zu eröffnen.

**Tab. 4.1** Untersuchte textile Flächengebilde;

Kennung innerhalb dieser Arbeit und Eigenschaften sowie die Herstellerangaben.

Kennung	Faser-material	Flächen-gewicht in g/m <sup>2</sup>	Gewebe-bindung	Ausrüstung	Hersteller	Produkt-bezeichnung
G_PET	Polyester	65	Köper <sup>4</sup> / <sub>4</sub>	stabilisiert	Franz Eckert GmbH	PES-5/1
G_PA	Polyamid 6.6	60	Köper <sup>2</sup> / <sub>2</sub>	-	PVF GmbH	PVFNL150007
G_GF	E-Glasfaser	80	Leinwand <sup>1</sup> / <sub>1</sub>	geschlichtet	Porcher Industries Germany GmbH	03G080LI
ET222	E-Glasfaser	165	Köper <sup>2</sup> / <sub>2</sub>	vorimprägniert mit Epoxidharz	Toray Group Composite Materials (Italy) s.r.l.	ET222

Durch die Verwendung von ET222 wäre die Herstellung eines FVK-Gelenkbauteils im Pressprozess statt im Infusionsprozess möglich. Die Taktzeiten sind kürzer und die Reproduzierbarkeit besser, so dass es aufgrund der erhöhten Wirtschaftlichkeit attraktiver für die industrielle Anwendung ist. Das textile Flächengewicht von ET222 entspricht mit  $m_A = 165 \text{ g/m}^2$  ca. 206 % des Flächengewichtes von G\_GF ( $m_A = 80 \text{ g/m}^2$ ) und ist somit annähernd eine Verdopplung des Flächengewichtes von G\_GF. Dadurch können vergleichende Untersuchungen mit beiden textilen Flächengebilden durchgeführt werden.

#### 4.1.2 Matrixsysteme

Die Matrixsysteme wurden auf Basis der in Kapitel 2.2 und 2.3 beschriebenen Untersuchungen und Bauteile ausgewählt. Die ausgewählten Materialien und ihre Kennung sind in Tab. 4.2 aufgeführt. Ausgehend von dem Epoxidharz, das für den flectofin® verwendet wurde (EP285), und dem Epoxidharz, das an der TU Dresden für die Untersuchung nachgiebiger Mechanismen genutzt wird (EP135), sind weitere Epoxidharzsysteme auf Bisphenol A-Basis Bestandteil der Untersuchungen, die laut Datenblatt im Vergleich zu EP135 und EP285 einen geringeren E-Modul aufweisen (EP760 und EP6427) und somit eine stärkere Flexibilisierung des Gelenkbereichs im Gelenkbauteil erlauben würden.

Aufgrund der besseren Witterungsbeständigkeit im Vergleich zu Epoxid erfolgte ebenfalls eine experimentelle Überprüfung eines Polyurethansystems (PUR224). Als duromer-kompatibles Elastomer wurde ein Elastomer auf Ethylvinylacetat (EVA)-Basis (HHZ99 bzw. HHZ82) ausgewählt. Neben der weißen Farbe, die im architektonischen Kontext von Bedeutung ist, ist diese Type witterungsbeständig und erfüllt die Anforderungen an die Baustoffklasse B2.



**Tab. 4.2 Untersuchte Matrixsysteme;**

Kennung innerhalb dieser Arbeit und Eigenschaften sowie die Herstellerangaben.

Kennung	Matrixtype	Hersteller	Produktbezeichnung
EP135	Epoxid	Hexion Specialty Chemicals Inc.	MGS™ RIMR135/MGS™ RIMH137
EP285	Epoxid	Hexion Specialty Chemicals Inc.	MGS™ LR285/MGS™ LH286
EP760	Epoxid	Hexion Specialty Chemicals Inc.	EPIKOTE™ 760/EPIKURE™ 05488
EP6427	Epoxid	Huntsman Advanced Materials GmbH	RenCast® 6427 A/RenCast® 5427 B
PUR224	Polyurethan	Elantas Italia s.r.l.	PC 224 GLASS MR/G124
HHZ99	Elastomer	Kraiburg GmbH & Co. KG	Kraibon HHZ9578/99
HHZ82	Elastomer	Kraiburg GmbH & Co. KG	Kraibon HHZ9628/82

### 4.1.3 Folienkaschierungen

Infolge der ausgewählten Epoxidharze auf Bisphenol A-Basis und deren schlechter Witterungsbeständigkeit werden auch Kaschierfolien in die Entwicklung des Hybridverbundes aus Elastomer und FVK einbezogen. Ohne eine Oberflächenkaschierung vergilbt der FVK bei Verwendung eines Epoxidharzes durch die UV-Strahlung in der Außenanwendung, und die mechanischen Eigenschaften verschlechtern sich. [36, 56, 84, 101]

Die Oberflächenkaschierung muss sowohl gute Haftungseigenschaften zu dem Elastomer auf EVA-Basis als auch zu dem Epoxidharz-imprägnierten FVK besitzen. Die Anbindung zu dem Epoxidharz wird als weniger kritisch betrachtet, da es im Vergleich zum Elastomer eine höhere Polarität aufweist. In den Untersuchungen werden die in Tab. 4.3 aufgeführten Kaschierfolien angesichts ihrer verhältnismäßig hohen Polaritäten, der weißen Farbe und der erwartbaren Witterungsbeständigkeit betrachtet.

**Tab. 4.3 Untersuchte Kaschiermaterialien;**

Kennung innerhalb dieser Arbeit und Eigenschaften sowie die Herstellerangaben.

Kennung	Material	Dicke in µm	Oberflächen- behandlung	Hersteller	Produkt- bezeichnung
PVC	hart PVC	290	-	Renolit SE	-
F_PET	PET	23	haftverbessert beidseitig	Mitsubishi Polyester Film GmbH	Hostaphan® WUV
F_LDPE	LDPE	100	Corona einseitig	Infiana Germany GmbH & Co. KG	LDPE-Film
TPU	TPE-U	(50) (100) (200) 300	-	Gerlinger Industries GmbH	4980
TPC	TPE-E	75	-	Infiana Germany GmbH & Co. KG	Muster 4

Neben Polyvinylchlorid (PVC) und zwei verschiedenen Folien auf Polyethylen-Basis (F\_PET und F\_LDPE) werden auch zwei Folien aus thermoplastischem Elastomer (TPU und TPC) in die Untersuchungen einbezogen. Bei den thermoplastischen Elastomerfolien handelt es sich um Multiblockcopolymerer auf Basis von Polyester (TPE) bzw. Polyurethan (TPU). Neben der hohen Schlagzähigkeit zeichnen sich die elastomeren Materialien durch ein gutes Dämpfungsvermögen bei mechanischen Schwingungen aus. Die Polarität beider thermoplastischen Elastomere ist hoch, so dass kein Haftvermittler o. Ä. notwendig ist. Die Oberflächenspannung von F\_PET und F\_LDPE ist durch eine Oberflächenbehandlung im Vergleich zu herkömmlichen Polyethylenterephthalat (PET) und Weich-Polyethylen (LDPE) erhöht, um die Haftung an die Elastomerschicht des Hybridverbunds zu verbessern. [36, 56]

## 4.2 Prozesse

Für die Herstellung der Prüfkörper werden innerhalb dieser Arbeit zwei verschiedene Prozesstechnologien angewandt: Vakuuminfusion und Heißpressen. Die Verfahren und die verwendeten Einstellungen werden im Nachfolgenden beschrieben. Für beide Verfahren wird das Trennmittel PAT 607/FB der Fa. E. und P. Würtz GmbH & Co. KG verwendet. Nach Vorversuchen mit verschiedenen Trennmitteln für die Duroplastverarbeitung zeigte dieses als einziges Trennmittel für alle ausgewählten Materialien ein gutes Trennverhalten. Durch die Verwendung des gleichen Trennmittels für alle Prüfkörper, unabhängig vom Herstellungsprozess, kann ein Einfluss auf die thermischen und mechanischen Eigenschaften des FVK durch das Trennmittel vernachlässigt werden.

### 4.2.1 Vakuuminfusionsprozess

Für die Herstellung aller Prüfkörper, mit Ausnahme derer, die ET222 enthalten, wird der Vacuum Assisted Process (VAP<sup>®</sup>) angewandt. Im Vergleich zu anderen Infusionsprozessen wie bspw. dem Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) wird der textile Laminataufbau zunächst durch eine semipermeable Membran versiegelt. Auf die Membran wird ein Vakuumvlies aufgelegt. Anschließend erfolgt die vollständige Versiegelung des gesamten Aufbaus mit einer Vakuumfolie. Durch das Vakuumvlies können über die gesamte Oberfläche des herzustellenden Bauteils Luft und Gase abgesaugt werden. Auf ein Entgasen des jeweiligen Matrixsystems vor der Infusion wird angesichts der gewählten Prozesstechnologie verzichtet. Der VAP<sup>®</sup>- und VARI-Prozess sind im Detail in Henning und Moeller (2011) [49] beschrieben. Alle Prüfkörperplatten werden 24 h bei Raumtemperatur unter anliegendem Vakuum mit einem Unterdruck von 100 mbar/abs. gehärtet und anschließend in einem Temperprozess bei 80 °C 15 h ohne Vakuum vollständig konsolidiert.

### 4.2.2 Heißpressverfahren

Die Prüfkörper, die ET222 enthalten, werden im Heißpressverfahren hergestellt. Es wird eine Presse der Fa. Laufer GmbH mit einer Pressfläche von  $1,07\text{ m} \times 0,75\text{ m}$  und einer evakuierbaren Presskammer sowie bis zu 500 t Druckkraft verwendet. Die Lamine zur Herstellung der Prüfkörper werden zwischen zwei Edelstahlplatten, ohne Formwerkzeug, gepresst. Zur Begrenzung des Fließweges des Epoxidharzes wird um die Prüfplattengeometrie endkonturnah ein Rahmen in der erforderlichen Dicke aus HHZ99 gelegt. Der Presszyklus mit den Presstemperaturen und dem effektiven Pressdruck ist in Abb. 4.1 dargestellt. Vor dem Beginn der auf der x-Achse dargestellten Heizzeit wird die gesamte Presskammer unter Vakuum gesetzt. Der Unterdruck beträgt 100 mbar/abs. und wird während des gesamten Presszyklus gehalten.

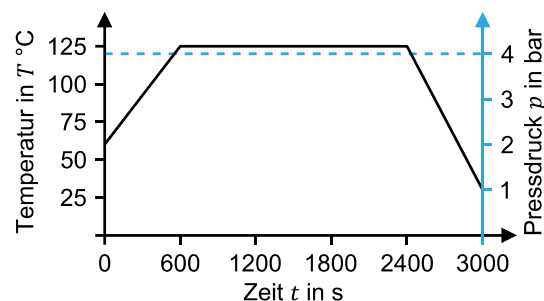


Abb. 4.1 Heißpress-Zyklus für Prüfkörperherstellung mit ET222 und HHZ99 bzw. HHZ82.

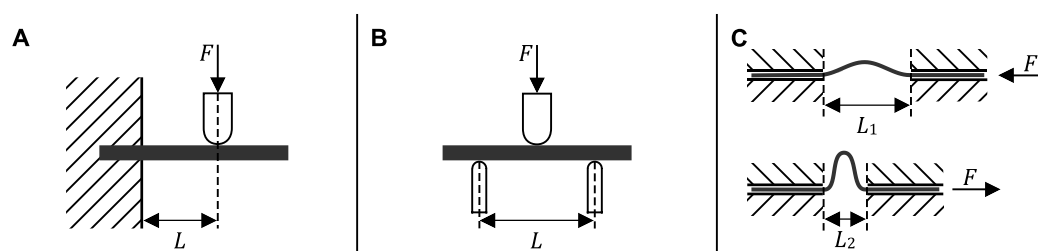
### 4.3 Prüfmethoden

Innerhalb dieser Arbeit werden verschiedene mechanische Prüfungen angewandt, die Aufschluss über die Eigenschaften der Einzelschichten des Hybridverbund und den Hybridverbund im Gesamten geben.

Die Biegeeigenschaften werden anhand von unterschiedlichen Biegeprüfungen charakterisiert. Für die Entwicklung des Hybridverbundmaterials bzw. zur Definition der Einzelschichtmaterialien werden 2-Punkt-Biegeprüfungen (vgl. Kapitel 4.3.1) durchgeführt. Der Lastfall ist schematisch in Abb. 4.2A dargestellt.

Im Vergleich zu anderen Prüfungen können die Biegeeigenschaften unter einem relativ großem Biegewinkel von  $90^\circ$  analysiert werden. Das spiegelt nicht den Lastfall einer Fasadenschattung mit Adaptivität durch Faltungsmuster wider: Hier sind Verformungswinkel von bis zu  $180^\circ$  erwartbar. Eine Prüfvorrichtung mit einem Verformungswinkel des Prüfkörpers um  $180^\circ$  und gleichzeitiger Messung der Kraft ist nach derzeitigem Stand der Technik jedoch nicht bekannt. Die Werte aus der 2-Punkt-Biegeprüfung liefern darüber hinaus keine absoluten Materialkennwerte, da der Kräfteintrag bei Verformung des Prüf-

körpers nicht konstant senkrecht zu diesem stattfindet. Sie können dementsprechend nur zum Vergleich der Biegeeigenschaften verschiedener Materialien herangezogen werden.



**Abb. 4.2 Schematische Darstellung der Prüfaufbauten (1);**

**A** 2-Punkt-Biegeprüfung in Anlehnung an DIN 53121:2014 [29], **B** 3-Punkt-Biegeprüfung nach DIN EN ISO 14125:2011 [27], **C** Dauerknickprüfung nach DIN 53359:2006 [24].

Für die experimentelle Bestimmung absoluter Kennwerte in Bezug auf die Biegeeigenschaften des Hybridverbunds werden innerhalb dieser Arbeit 3-Punkt-Biegeprüfungen (vgl. Kapitel 4.3.2) durchgeführt. Der Lastfall ist in Abb. 4.2B schematisch dargestellt. Da der Verformungswinkel verhältnismäßig gering ist, kann diese Prüfung allerdings nicht für die Analyse der Biegeeigenschaften innerhalb der Entwicklung des Hybridverbunds herangezogen werden.

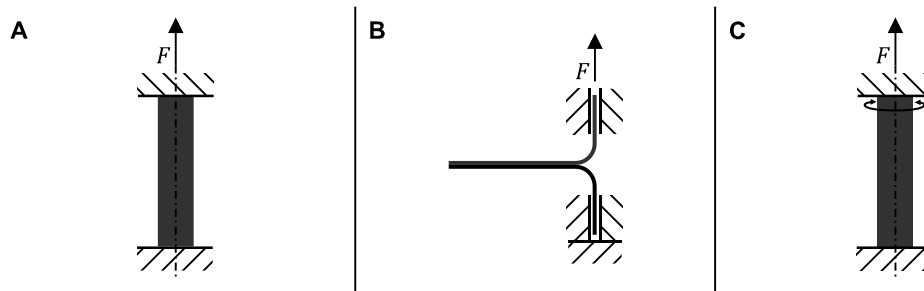
Neben der 2-Punkt- und der 3-Punkt-Biegeprüfung findet die Dauerknickprüfung (vgl. Abb. 4.2C) in dieser Arbeit Anwendung. Mit dieser Prüfvorrichtung können keine Kräfte gemessen, jedoch das Materialverhalten des Hybridverbunds unter zyklischer Beanspruchung mit einem Biegewinkel von quasi  $180^\circ$  untersucht werden (vgl. Kapitel 4.3.3). Anhand von mikroskopischen Aufnahmen wird innerhalb dieser Arbeit im Anschluss an die Dauerknickprüfung die Verbundfestigkeit der Einzelschichten im Hybridverbund analysiert.

Neben den Biegeeigenschaften werden auch die Festigkeiten der Einzelschichten des Hybridverbunds und des Hybridverbunds im Gesamten experimentell bestimmt. Die Auswahl der zu diesem Zweck durchgeführten Zug- oder Schubprüfungen (vgl. Kapitel 4.3.4) erfolgt abhängig von der Faserorientierung. Der Lastfall ist in Abb. 4.3A gezeigt. Durch die Prüfungen wird zum einen die Datenbasis für die analytische Berechnung der Lamineigenschaften generiert und zum anderen die Restzugfestigkeit von Gelenkbauteilen nach zyklischer Biegebelastung bestimmt.

Die Festigkeit zwischen den Einzelschichten des Hybridverbunds wird in einer T-Schälprüfung unter Mode I-Belastung geprüft. Der Lastfall ist schematisch in Abb. 4.3B dargestellt. Die Prüfung wird in Kapitel 4.3.5 beschrieben.

Darüber hinaus wird der Hybridverbund hinsichtlich des gestellten Anforderungsprofils für Außenfassadenbauteile überprüft. Hierzu wird die Temperaturstabilität bzw. die Glasübergangstemperatur mittels Dynamisch-Mechanisch-Thermischer Analyse (DMTA) bestimmt. Der schematische Aufbau der Prüfvorrichtung ist in Abb. 4.3B dargestellt. Die

Prüfung selbst wird im Kapitel 4.3.6 näher beschrieben. Neben der DMTA zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur wird die für den Bau spezifische Brandprüfung nach DIN 4102-1:1998 [22] (vgl. Kapitel 4.3.7) zur Ermittlung der Baustoffklasse durchgeführt. Darüber hinaus wird die Witterungsbeständigkeit anhand von Umweltsimulationen, Gelbwert- und Festigkeitsprüfungen (vgl. Kapitel 4.3.8) untersucht.



**Abb. 4.3 Schematische Darstellung der Prüfaufbauten (2);**

**A** Zug- bzw. Schubprüfung nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] bzw. DIN EN ISO 14129:1998 [23], **B** T-Schälprüfung nach DIN EN ISO 11339:2010 [26], **C** Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse (DMTA) mit Schwingungsart Typ IV nach DIN EN ISO 6721-1:2019 bzw. DIN EN ISO 6721-2:2019 [34, 35].

Die angewandten Methoden sowie die zugehörigen Versuchsparameter sind in den nachfolgenden Kapiteln im Detail dargestellt. Alle mechanischen Untersuchungen werden im spezifischen Normklima für die Prüfung von Textilien nach DIN EN ISO 139:2011 bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte durchgeführt [28].

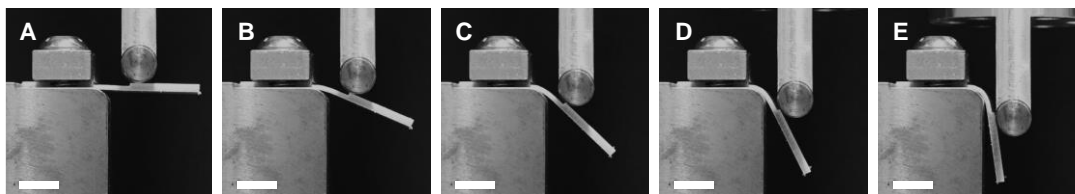
### 4.3.1 2-Punkt-Biegeprüfung

Eine 2-Punkt-Biegeprüfung wird im Bereich der Kunststoffe im Allgemeinen nicht eingesetzt. Die Biegeeigenschaften werden üblicherweise in einer 3-Punkt- oder 4-Punkt-Biegeprüfung untersucht. Im Hinblick auf die Charakterisierung der Biegeeigenschaften für die Anwendung eines Materials in adaptiven Fassadenverschattungen ist allerdings nur das Verformungsverhalten des Prüfkörpers im linear-elastischen Bereich relevant. Die Prüfkörper werden nicht bis zum Versagen geprüft, sondern lediglich die initialen Biegeeigenschaften zur vergleichenden Analyse unterschiedlicher Materialien und Materialaufbauten ermittelt.

Für Papier und Pappe werden zu diesem Zweck 2-Punkt-Biegeprüfungen nach DIN 53121:2014 [29] durchgeführt. Für diese Materialien ist die Bestimmung der Biegesteifigkeit von Bedeutung, um bspw. eine zuverlässige Weiterverarbeitung auf Konfektionier- und Verpackungsmaschinen zu gewährleisten. Das Papier bzw. die Pappe muss innerhalb definierter Grenzen eine bestimmte Flexibilität aufweisen, und die Biegeeigenschaften müssen auch bei einem Wechsel der Papiercharge konstant sein. Allerdings kommt es bei direkter Übertragung dieser Prüfmethodik auf FVK zu einem undefinierten Durchbiegen des ein-

seitig eingespannten Kragarms. Der Abstand von Einspannung zu Kräfteintragungspunkt beträgt lt. Norm 50 mm, so dass sich kein definierter Biegeradius einstellt. Dieser Prüfaufbau wäre anwendbar für die Untersuchung von langen nachgiebigen Verbindungen analog zu Abb. 2.1C, jedoch nicht für lokale Gelenke in FVK-Gelenkbauteilen (vgl. Abb. 2.1B), die Bestandteil der Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit sind.

Daher wird in Anlehnung an DIN 53121:2014 [29] eine 2-Punkt-Biege-Prüfvorrichtung entwickelt, konstruiert und gebaut, die ein definiertes Biegen der Prüfkörper um  $90^\circ$  mit einem vorgegebenen Biegeradius vorsieht. Der schematische Prüfaufbau ist in Abb. 4.2A und der technisch umgesetzte Aufbau in Abb. 4.4 dargestellt. Die Prüfhalterung besteht aus einem Block mit abgerundeter Kante (Radius  $r = 5$  mm). In die Oberseite ist ein Absatz gefräst, der als Anschlag für die Prüfkörperplatzierung dient. Der Prüfkörper wird durch eine beidseitig verschraubte Klemmplatte über seine gesamte Breite ( $b = 25$  mm) fixiert. Die Gesamtlänge des Prüfkörpers beträgt  $l = 50$  mm. Das freie Ende ab der Klemmung ist 30 mm lang.



**Abb. 4.4** 2-Punkt-Biegeprüfung eines Gelenkbauteils in Anlehnung an DIN 53121: 2014 [26] mit verschiedenen Durchbiegungen  $s$ ;

A  $s = 0$  mm, B  $s = 3,75$  mm, C  $s = 7,50$  mm, D  $s = 11,50$  mm, E  $s = 15,00$  mm.

Die eingetragene Kraft bzw. die Druckfinne trifft in einem Abstand von 11,5 mm (Stützweite  $L$ ) auf den Prüfkörper. Im Gegensatz zum normativen Aufbau ist neben der Stützweite auch die Prüfkörperbreite reduziert (lt. Norm 38 mm). Die Prüfkörperbreite entspricht innerhalb dieser Arbeit der Breite eines Zugprüfkörpers entsprechend DIN EN ISO 527-4: 1997 [20]. Durch die Verkürzung der Stützweite  $L$  wird die Verformung des Prüfkörpers in dem definierten Radius von  $r = 5$  mm gewährleistet. Unabhängig von der Steifigkeit des Prüfkörpers stellt sich somit das gleiche Verformungsverhalten ein, und die Messergebnisse der unterschiedlichen Prüfkörperaufbauten sind vergleichbar. Der Stichprobenumfang beträgt  $n = 5$ .

Für die Prüfung wird eine Z020 Materialprüfmaschine der Fa. ZwickRoell mit einem 1 kN-Messkopf verwendet. Jeder Prüfkörper wird über zwei Lastspiele geprüft, wobei die Prüfgeschwindigkeit  $v = 10$  mm/min beträgt. Das zweite Lastspiel dient zur Kontrolle einer möglichen Schädigung des FVK im ersten Lastspiel. Der Prüfkörper wird durch einen Verfahrweg der Druckfinne von 15 mm effektiv um  $90^\circ$  um die abgerundete Kante des Prüfblocks gebogen. Der Biegeradius ist folglich für alle Prüfkörper gleich.

Die aus der Bewegung resultierende Biegespannung  $\sigma_b$  wird nach der Formel (4.1) mit der wirkenden Kraft  $F$ , der Stützweite  $L$ , und der Prüfkörperbreite  $b$  bzw. Prüfkörperdicke  $h$  berechnet. Die Biegesteifigkeit  $EI$  des Prüfkörpers resultiert aus der Formel (4.2) mit der Durchbiegung  $s$ .

$$\sigma_b = \frac{6FL}{bh^2} \quad (4.1)$$

$$EI = \frac{\Delta F \cdot L^3}{3 \cdot \Delta s} \quad (4.2)$$

Für die Prüfung wird aufgrund des zum Teil sehr geringen Verformungswiderstandes keine Vorkraft gesetzt. Daher werden statt der üblichen Weggrenzen Kraftgrenzen für die Ermittlung der Biegesteifigkeit  $EI$  nach Formel (4.2) gesetzt. Nach Sichtung aller Prüfkörper werden  $F' = F_{max}/20$  und  $F'' = F_{max}/10$  als Kraftgrenzen mit den zugehörigen Durchbiegungen  $s'$  und  $s''$  festgelegt, da diese Werte im linearen Steigungsbereich der Kraft/Weg-Kurve liegen. Die Methodik Kraft- anstelle von Weggrenzen zu definieren ist aus anderen Biegeprüfungen für FVK (DIN EN 2562:1997 für die 3-Punkt-Biegeprüfung unidirektionaler CFK [21]) bereits bekannt und kann auf diese Prüfung übertragen werden.

In Abb. 4.5 ist exemplarisch die Kraft-Weg-Kurve über zwei Lastspiele eines Prüfkörpers gezeigt. Es ist festzustellen, dass eine Restverformung nach dem ersten Lastspiel besteht.

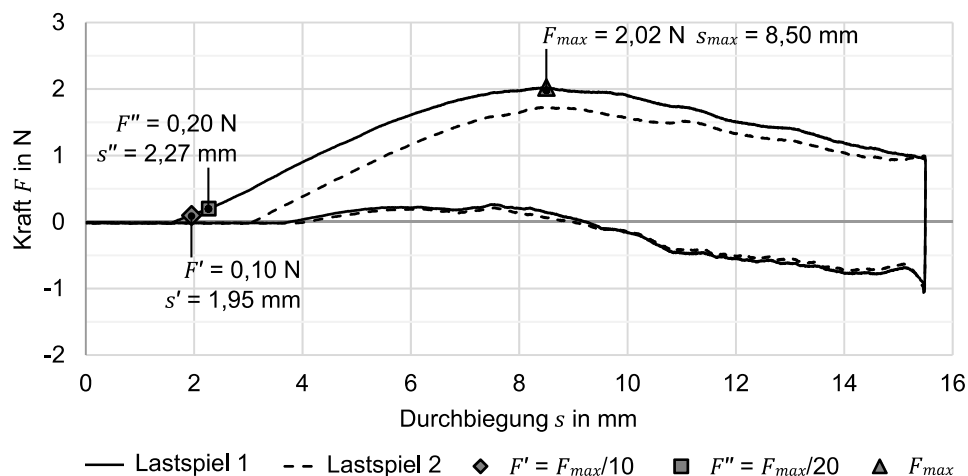


Abb. 4.5 Exemplarisches Kraft-Weg-Diagramm für 2-Punkt-Biegeprüfung über zwei Lastspiele.

Der Prüfkörper stellt sich innerhalb der Zeit bis zur erneuten Belastung nicht vollständig in die Ausgangsposition zurück, so dass die gemessene Kraft im zweiten Zyklus versetzt zur ersten ansteigt. Das Maximum ist zudem niedriger als im ersten Zyklus. Eine Schädigung des Laminats bzw. des spröden Duromers ist nicht auszuschließen, jedoch nach zwei Lastspielen nicht optisch in mikroskopischer Analyse ersichtlich. Entsprechend der

maximalen Kraft  $F_{max} = 2,02 \text{ N}$  wird die Biegesteifigkeit innerhalb der Kraftgrenzen  $F' = F_{max}/20 = 0,10 \text{ N}$  und  $F'' = F_{max}/10 = 0,20 \text{ N}$  bestimmt. Die Biegesteifigkeit  $EI$  beträgt  $164,57 \text{ Nmm}^2$ . Die maximal auftretende Biegespannung ohne Versagen des Prüfkörpers beträgt  $\sigma_b = 9,79 \text{ MPa}$ . Die negativ gemessenen Kräfte resultieren aus der Friktion zwischen Prüfkörper und Druckfinne bei der Entlastung des Prüfkörpers bzw. beim Hochfahren der Druckfinne.

### 4.3.2 3-Punkt-Biegeprüfung

Die 3-Punkt-Biegeprüfung wird nach DIN EN ISO 14125:2011 [27] mit einem Stichprobenumfang  $n = 5$  durchgeführt. Der Lastfall ist schematisch in Abb. 4.2B dargestellt. Es wird die Werkstoffklasse II (mit Gewebe oder Mischformaten verstärkte Kunststoffe) festgelegt. Die Prüfkörpermaße betragen entsprechend  $l = 80 \text{ mm}$  und  $b = 15 \text{ mm}$ . Die Stützweite wird aufgrund der von der Norm abweichenden Dicke der Prüfkörper mit einem Verhältnis von  $L/h = 16$  und die Prüfgeschwindigkeit  $v$  nach Formel (4.3) mit  $\varepsilon' = 0,01$  berechnet. Abhängig von der Dicke  $h$  der Prüfkörper wird die Geschwindigkeit auf  $v = 0,5 \text{ mm/min}$  bzw.  $v = 2,6 \text{ mm/min}$  eingestellt. Für die Prüfung wird eine Z020 Materialprüfmaschine der Fa. ZwickRoell mit einem  $1 \text{ kN}$ -Messkopf verwendet. Die aufgebrachte Vorkraft beträgt  $1 \text{ N}$ . Nach Formel (4.4) ergibt sich die aus der Bewegung resultierende Biegespannung  $\sigma_b$  und die Biegesteifigkeit  $EI$  des Prüfkörpers wird nach Formel (4.5) berechnet.

$$v = \frac{\varepsilon' L^2}{6h} \quad (4.3)$$

$$\sigma_b = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.4)$$

$$EI = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta s} \quad (4.5)$$

Die in der Norm angegebenen Durchbiegungen  $s'$  und  $s''$  für die Berechnung des Biegemoduls mit den Randfaserdehnungen  $\varepsilon_{f'} = 0,05 \text{ \%}$  und  $\varepsilon_{f''} = 0,25 \text{ \%}$  wurden auf die Berechnung der Biegesteifigkeit  $EI$  nach Formel (4.5) übertragen.



### 4.3.3 Dauerknickfestigkeit

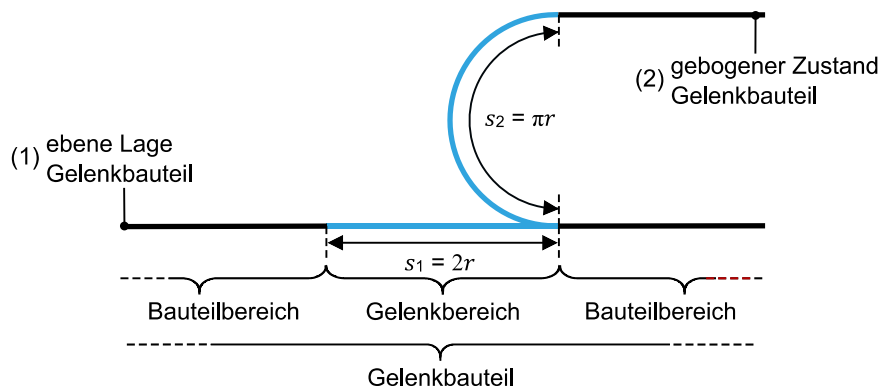
Zur Untersuchung der Haftung der Oberflächenkaschierungen am Hybridverbund werden Dauerknickversuche in Anlehnung an DIN 53359:2006 [24] durchgeführt. Der schematische Prüfaufbau ist in Abb. 4.2C dargestellt. Die Prüfkörpergeometrie entspricht Form A mit  $b = 20$  mm und  $l = 40$  mm. Die Norm sieht die Prüfung von Leder und ähnlichen textilen Flächengebilden vor. Der in der Norm angegebene Minimalabstand der Klemmbacken bei Knickung  $L_2$  ist entsprechend zu klein für die Knick- bzw. Faltbelastung von FVK. Sie würden um einen Radius von  $r = 1$  mm geknickt werden, was zu einem Brechen des Hybridverbunds führen würde. Abweichend von der Norm wird der Minimalabstand der Klemmbacken bei Prüfkörperbelastung auf  $L_2 = 11$  mm und der Maximalabstand bei Prüfkörperentlastung auf  $L_1 = 28$  mm festgelegt (vgl. Abb. 4.2C).

Der Minimalabstand  $L_2$  ist also 8 mm größer, als er nach Norm für die Prüfkörperdicke sein sollte. Der Maximalabstand  $L_1$  wird folglich ebenso 8 mm größer eingestellt, so dass der Hub wiederum der Norm entspricht. Für die Prüfung wird eine an den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung (DITF) entsprechend DIN 53359:2006 [24] angefertigte Prüfvorrichtung verwendet. Der Stichprobenumfang beträgt  $n = 5$ . Die Prüfkörper werden mit 5.000 Knickungen unter einer Prüffrequenz von 20 Knickungen pro Minute belastet, d. h. mit 0,33 Hz. Anschließend wird die Haftung der Oberflächenkaschierung und die Faltenbildung auf der Oberfläche in einer Sichtprüfung makroskopisch und mittels Schliffbildaufnahmen unter einem Auflichtmikroskop mikroskopisch beurteilt.

### 4.3.4 Zug- und Schubprüfung

Die Zugprüfungen bzw. Schubprüfungen werden nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] bzw. DIN EN ISO 14129:1998 [23] durchgeführt. Der Aufbau ist schematisch in Abb. 4.3A dargestellt. Für die Prüfung wird eine Z100 Materialprüfmaschine der Fa. ZwickRoell mit einem 100 kN-Messkopf verwendet. Nach Vorversuchen hinsichtlich möglicher Klemmbrüche wird der Prüfkörpertyp 2 festgelegt, d. h. die Prüfungen werden ohne Aufleimer durchgeführt. Die Prüfkörpermaße betragen  $b = 25$  mm und  $l = 250$  mm. Die Messung der Dehnung der Prüfkörper zur Ermittlung der mechanischen Kenndaten der Einzelschichten unter Zuglast erfolgt optisch. Mit dem Kamerasystem ARAMIS GOM wird diese zweidimensional erfasst. Bei der Prüfung der Restzugfestigkeit zyklisch geprüfter Gelenkbauteile wird keine optische Dehnungsmessung vorgenommen. Der Stichprobenumfang für die Ermittlung mechanischer Kenndaten als Berechnungsgrundlage des Hybridverbunds ist  $n = 10$ . Abhängig von der Faserorientierung wird nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] oder DIN EN ISO 14129:1998 [23] geprüft. Von fünf zyklisch geprüften Gelenken, werden  $n = 3$  entsprechend der Faserorientierung im Gelenk nach DIN EN ISO 14129:1998 [23] geprüft. Die gesetzte Vorkraft beträgt für alle Prüfkörperarten 15 N.

Da das Elastomer und die Kaschierfolie im Zugversuch für FVK nach [20] nicht reißen, wird eine maximale Dehngrenze eingestellt. Für die Bestimmung der Dehngrenze wird die maximal im Gelenkbauteil mögliche Dehnung angenommen, die allerdings nur eintreten kann, wenn der GFK-Anteil im Gelenkbereich durch die Biegeverformung versagt. Unter idealer Biegung würde die Dehnung des Gelenkbereichs dann der Umfangslängenänderung des Prüfkörpers entsprechen. Die Länge des nachgiebigen Gelenkbereichs ist im Fall einer Biegung um  $180^\circ$  nicht länger  $s_1 = 2r$ , sondern  $s_2 = \pi r$  (vgl. Abb. 4.6).



**Abb. 4.6 Schematische Darstellung der Längenänderung im Gelenkbereich eines Gelenkbauteils unter Annahme eines Versagens des GFK-Anteils im Hybridverbund.**

Mit dem Dreisatz berechnet, ist das Material am äußersten Punkt folglich um maximal ca. 57 % gedehnt. Dieser Wert wird als maximale Streckgrenze im Zugversuch gesetzt. Sofern der GFK-Anteil im Gelenkbereich nicht versagt, ist allerdings davon auszugehen, dass die Länge des Gelenkbereichs bereits in ebener Lage  $\pi r$  beträgt. Er würde bei der Biegebewegung hauptsächlich verformt und nur in den äußersten Schichten, relativ zur neutralen Faser, gedehnt.

#### 4.3.5 T-Schälprüfung

Für Faserverbundkunststoffe findet bei der Untersuchung der interlaminaren Festigkeit unter Mode I-Belastung im Normalfall die ASTM D5528-13 [8] Anwendung. Sie ist jedoch nur für die Untersuchung steifer Lamine geeignet. Die aus dem Hybridverbund hergestellten Lamine weisen allerdings aufgrund des Elastomers eine grundsätzliche Nachgiebigkeit auf, so dass die ASTM D5528-3 [8] nicht angewandt werden kann.

Die T-Schälprüfung nach DIN EN ISO 11339:2010 [26] sieht dagegen die Prüfung von flexiblen Laminen unter Mode I-Belastung vor. Der schematische Aufbau ist in Abb. 4.3B dargestellt. Allerdings behandelt die Norm die Prüfung von Klebstoffverbindungen und wird herkömmlicherweise nicht für die Überprüfung der Delaminationseigenschaften von FVK eingesetzt. Obwohl im Hybridverbund die Einzelschichten im Pressprozess ohne Klebstoffe und Haftvermittler gefügt werden, kann diese Prüfung an-

gewandt werden. Die Ergebnisse werden lediglich vergleichend untereinander für die Haftung der verschiedenen Materialschichten zueinander betrachtet und sollen nicht als Absolutwerte in die Berechnungen einfließen. So kann im Vergleich zu einer Prüfung nach ASTM D5528-13 [8] auf eine Vielzahl versteifender Schichten des FVK im Laminataufbau verzichtet und die Prüfung so materialeffizient wie möglich ausgeführt werden.

Für die Prüfung nach DIN EN ISO 11339:2010 [26] werden gewellte Klemmbacken verwendet und keine Vorkraft gesetzt. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 10 mm/min. Für die Prüfung wird eine Z020 Materialprüfmaschine der Fa. ZwickRoell mit einem 1 kN-Messkopf verwendet. Der Stichprobenumfang beträgt  $n = 10$ . Die Prüfkörper haben die Maße  $b = 25$  mm und  $l = 250$  mm. Die geprüfte Länge ist 175 mm, wobei die ersten 50 mm und die letzten 25 mm in der Auswertung der mittleren Trennkraft  $F_{mitt}$  nicht berücksichtigt werden. Zwischen den Prüfkörpern wird die berechnete mittlere Schälkraft je 100 mm Prüfkörperbreite  $F_{mitt\_100}$  in Newton verglichen.

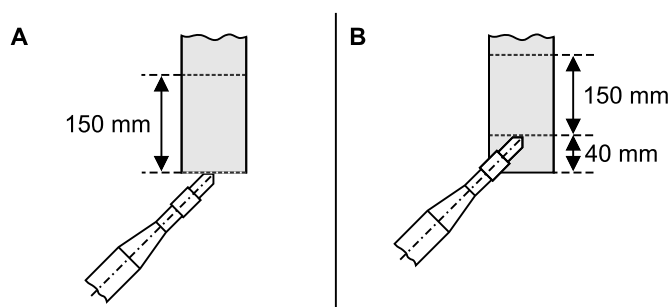
#### 4.3.6 Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse

Bei der Ermittlung der Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) liefert die Dynamische Differenzkalorimetrie keine eindeutigen Ergebnisse für das Elastomer und die Kaschierfolie. Daher wird die Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse (DMTA) [34] angewandt, wobei die resultierenden mechanischen Eigenschaften innerhalb dieser Arbeit unberücksichtigt bleiben. Sie dient ausschließlich der Bestimmung der Glasübergangstemperatur. Es wird nach DIN EN ISO 6721-2:2019 mit der Schwingungsart Typ IV und Verfahren B geprüft, bei der der obere Teil des Prüfkörpers durch eine sinusförmige Schwingung angeregt wird [35]. Der zeitliche Versatz zwischen Krafteintrag (Anregung) und der Deformation (Antwort) ist  $\tan\delta$ . Darüber hinaus lassen sich das Torsionsspeichermodul  $G'$  und das Torsionsverlustmodul  $G''$  bestimmen. Die Glasübergangstemperatur liegt im Maximum von  $G''$  bzw. im Wendepunkt von  $\tan\delta$ . Der schematische Aufbau ist in Abb. 4.3C dargestellt. Für die Prüfung wird ein Dynamic Mechanical Analyzer (MCR 702 MultiDrive) der Fa. Anton Paar mit der Prüfkörperaufnahme SRF 12 verwendet. Die eingestellte Schwingungsfrequenz beträgt 1 Hz und die Heizrate 2 °C/min. Der Stichprobenumfang beläuft sich auf  $n = 3$  und die Prüfkörpermaße sind  $b = 10$  mm und  $l = 50$  mm. Der erste Prüfkörper wird mit den Temperaturgrenzen -50 °C und +200 °C gemessen. Entsprechend der für den ersten Prüfkörper bestimmten Glasübergangstemperatur werden für den zweiten und dritten Prüfkörper die Temperaturgrenzen enger gesetzt.

#### 4.3.7 Brandverhalten

Das Brandverhalten des Hybridverbunds wird exemplarisch an zwei möglichen Laminataufbauten, jeweils einem für den Gelenk- und Bauteilbereich, nach DIN 4102-1:1998 [22] untersucht. Die Entflammbarkeit wird sowohl unter Flächen- als auch unter Kantenbeflam-

mung geprüft. Die Prüfung erfolgt in einer an den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung (DITF) entsprechend DIN 4102-1:1998 [22] angefertigte Brandkammer. Der Aufbau ist schematisch in Abb. 4.7 dargestellt.



**Abb. 4.7 Schematische Darstellung der Prüfaufbauten (3);**

**A** Kantenbeflammung nach DIN 4102-1:1998 [22], **B** Flächenbeflammung nach DIN 4102-1:1998 [22]

Der Brenner ist bei der Beflammung um  $45^\circ$  geneigt. Die Prüfkörpergröße beträgt  $b = 90$  mm und  $l = 230$  mm. Der Stichprobenumfang ist  $n = 5$ . Für die Kantenbeflammung wird eine Messmarke im Abstand von 150 mm zur Prüfkörperkante aufgebracht (vgl. Abb. 4.7A). Für die Flächenbeflammung werden zwei Messmarken aufgebracht: Messmarke (I) ist 40 mm entfernt von der Prüfkörperkante: Hier trifft die Flamme bei der Prüfung auf die Oberfläche des Prüfkörpers. Messmarke (II) ist 150 mm entfernt von Messmarke (I). Der Hybridverbund muss entsprechend der Spezifikationen für Außenfassadenbauteile die Anforderungen der Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) erfüllen. Das bedeutet, dass die auf den Prüfkörpern eingezeichnete Messmarke ab Beginn der Beflammungsdauer von  $t = 15$  s nicht in unter  $t = 20$  s erreicht werden darf.

#### 4.3.8 Umweltsimulation im Klimaschrank und Gelbwertmessung

Der entwickelte Hybridverbund wird in Anlehnung an DIN EN ISO 4892-3:2016 [32] bewittert. Im Klimaschrank werden die Prüfkörper mit der zu bewitternden Seite in Richtung der UV-Leuchtstofflampen spannungsfrei aufgehängt. Die Bewitterungsseite ist die Seite des Hybridlaminats mit FVK unter der Kaschierfolie. Das verwendete Elastomer ist lt. technischem Datenblatt witterungsbeständig, so dass dessen Prüfung nicht notwendig ist. Im Klimaschrank werden die Prüfkörper Bewitterungszyklen, die der „Klimazone Mitteleuropa“ entsprechen, ausgesetzt. Die Prüfkörper werden mit bis zu  $70^\circ\text{C}$  und hoher Luftfeuchte im Wechsel mit Raumtemperatur, Frost und Regen beaufschlagt. Die Wellenlänge der UV-Belastung beträgt 290 bis 420 nm. Je Woche wird jeweils eine Prüfplatte mit bzw. ohne Oberflächenkaschierung (acht Prüfplatten insgesamt, vier mit und vier ohne Oberflächenkaschierung) zur Messung der Restzugfestigkeit nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] entnommen. Dabei entspricht eine Woche einem Jahr, 2 Wochen 3,5 Jahren,

3 Wochen 6,5 Jahren und 4 Wochen 12 bis 13 Jahren. Nach der Prüfkörperentnahme wird die Änderung des Gelbwertes auf der FVK- und Elastomer-Seite nach DIN 6167 [19] gemessen. Dazu wird ein Spektralphotometer der Fa. X-Rite (Color i<sup>TM</sup>7) verwendet. Es wird die Normlichtart D 65 für den 10°-Normalbeobachter mit  $a=1,301$  und  $b=1,149$  angewandt. Jede Platte wird in drei Punkten vermessen und die Messwerte im Programm des Spektralphotometers automatisch zu einem Mittelwert verrechnet.

## 4.4 Statistische Methoden

Innerhalb dieser Arbeit gilt es im Rahmen der Analyse der experimentell erhobenen Daten zwei statistische Methoden anzuwenden, die nachfolgend zum besseren Allgemeinverständnis umrissen werden. Beide Methoden werden innerhalb dieser Arbeit automatisiert mit dem Programm Minitab 19 (Minitab GmbH) durchgeführt und werden daher lediglich verallgemeinert beschrieben.

### 4.4.1 Varianzanalyse

Durch die Varianzanalyse (engl. Analysis of Variance, kurz ANOVA) wird geprüft, ob die Varianz zwischen den zu vergleichenden Stichproben größer ist als die Varianz innerhalb einer Stichprobe. Über den Vergleich der Varianzen wird bestimmt, ob der unabhängige Faktor einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis des abhängigen Faktors hat. Die Nullhypothese lautet: „Alle Mittelwerte sind gleich.“; die Alternativhypothese lautet: „Nicht alle Mittelwerte sind gleich“.

Für die ANOVA werden im ersten Schritt die Varianz der Grundgesamtheit und die Teilvarianzen der Faktorstufen berechnet. Die Teilvarianzen überlagern sich additiv und bilden in der Summe mit einem nicht erklärbaren Restbetrag die Varianz der Grundgesamtheit. Das Verhältnis dieses Restbetrages zu den Teilvarianzen liefert eine dimensionslose Kennzahl: Den F-Wert. Je größer der F-Wert, desto signifikanter der Einfluss des Faktors. Über das Statistikprogramm wird gleichzeitig die Irrtumswahrscheinlichkeit, der p-Wert, ausgegeben. Er zeigt an, ob die Nullhypothese verworfen werden muss oder angenommen werden kann. Das Signifikanzniveau beträgt für alle innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Varianzanalysen  $\alpha = 0,05$  und entspricht einer fünfprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit bei Annahme bzw. Ablehnung der Nullhypothese. Die Nullhypothese ist basierend auf dem festgelegten Signifikanzniveau zu verwerfen, wenn der p-Wert  $< 0,05$  ist. Ist der p-Wert  $> 0,05$  kann die Nullhypothese unter einem Risiko von 5 %, dass sie doch nicht zutreffend ist, angenommen werden. [40, 102]

### 4.4.2 Regressionsanalyse

In der Regressionsanalyse werden Funktionen abgeleitet, die den Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variablen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen darstellen. Die Regression ist folglich eine Vorhersageanalyse für abhängige Variablen. Innerhalb dieser Arbeit werden ausschließlich lineare Regressionsmodelle angewandt. Die allgemeine Form der Regressionsfunktion lautet:

$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_{n_f}x_{in_f} + \varepsilon_i \quad (4.6)$$

Dabei ist  $y_i$  die zu analysierende bzw. durch die Regressionsfunktion abzubildende abhängige Variable. Die unabhängigen Variablen sind  $x_i - x_{in_f}$ . Besteht ein signifikanter Einfluss der unabhängigen Variablen bzw. der Wechselwirkungen unter ihnen auf die abhängige Variable, werden sie in der Regressionsfunktion berücksichtigt. Nicht signifikante Einflussgrößen werden vernachlässigt, da jede Variable die Freiheitsgrade in dem Modell reduziert, und somit der Einbezug aller Größen zu einem überbestimmten Regressionsmodell führen kann. Die Konstanten  $b_0 - b_{n_f}$  werden auf Basis der vorhandenen Messdaten bestimmt. Zur Bestimmung der Modellkonstanten  $b$  wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate angewandt. Die Differenz zwischen der Summe der quadratischen Abweichungen der Datenpunkte und der durch das Regressionsmodell prognostizierten Punkte wird dabei minimiert.  $\varepsilon_i$  bildet den Fehler des Modells ab, der nicht durch die Regressionsfunktion erklärt werden kann. [40, 102]

Für jedes Regressionsmodell wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bestimmt. Dabei wird das Verhältnis der die durch die Regression erklärten Quadratsumme  $SSE$  zu der totalen Quadratsumme der Datenbasis  $SST$  berechnet (vgl. Formel (4.7)). Der Maximalwert des Bestimmtheitsmaßes ist 1 und würde einer Aufklärung von 100 % entsprechen. Zur Vermeidung einer Überanpassung der Regressionsfunktion durch Berücksichtigung nicht signifikanter Faktoren, bei mehr als einem Faktor, muss neben dem empirischen Bestimmtheitsmaß  $R^2$  auch das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{korr}$  (vgl. Formel (4.8)) betrachtet werden. Hier wird auch das Verhältnis der Anzahl der Faktoren  $n_F$  zu der Anzahl der Daten  $n_D$  berücksichtigt. Der Wert des korrigierten Bestimmtheitsmaßes  $R^2_{korr}$  ist folglich in der Regel niedriger als der des empirischen Bestimmtheitsmaßes  $R^2$ .

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4.7)$$

$$R^2_{korr} = 1 - \frac{SSE}{SST} \cdot \frac{n_D - 1}{n_D - n_F} \quad (4.8)$$

## 5. Materialentwicklung

In Kapitel 5 wird die methodische Vorgehensweise für die Entwicklung eines Materialaufbaus für adaptive Fassadenbauteile, die innerhalb dieser Arbeit entwickelt wurde, vorgestellt und auf die Entwicklung des Hybridverbunds angewandt. Für jeden Entwicklungsschritt werden die Prüfergebnisse für den in dieser Arbeit verfolgten Materialansatz (III) (vgl. Abb. 2.3C) gezeigt und interpretiert. Bei der Entwicklung des Materialaufbaus für adaptive Fassadenbauteile ist im Allgemeinen so vorzugehen, dass die einzelnen Schritte eine Filterwirkung auf die grundsätzlich in Betracht gezogenen Materialien haben: Durch jede Prüfung entfallen schrittweise einzelne Materialien, die ungeeignet oder weniger tauglich sind als andere Materialien. Im letzten Schritt der Materialentwicklung kann unter Berücksichtigung des Anwendungsfalls folglich nur ein Material als das geeignetste Material ausgewählt werden. Dieses Vorgehen hat einen großen Vorteil hinsichtlich der Zeit- und Kosteneffizienz der Entwicklungsarbeit, da nicht alle Prüfungen für alle Materialien durchgeführt werden müssen. Insbesondere im architektonischen Kontext der Materialentwicklung ist dies relevant, da es sich hier – im Gegensatz zu anderen Branchen – häufig um die Fertigung von Unikaten für den gehobenen Bau handelt. Somit kann überwiegend nicht auf Kennwerte aus der Serienproduktion oder dem Testbetrieb zurückgegriffen werden, so dass der Entwicklungsprozess grundsätzlich stets sehr umfangreich ist, und jede Verschlinkung dieses Prozesses zur Effizienz im Gebäudebau beiträgt.

An das, nach Arbeitshypothese (1) durch die Kombination von Elastomer mit duroplastischem FVK herstellbare, Hybridmaterial für FVK-Gelenkbauteile werden für die Anwendung als adaptives Fassadenbauteil nachstehende Anforderungen gestellt:

- (1) Steifigkeitsvariation trotz Materialhomogenität
- (2) Witterungsstabilität, d. h. keine Farbänderung oder Festigkeitsverlust unter Witterungseinfluss
- (3) Verbundfestigkeit zwischen den Einzelschichten des Hybridverbunds
- (4) Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) außerhalb der Temperatur-Einsatzgrenzen von Fassadenbauteilen (-20 °C bis +80 °C) nach DIN 18516-1:2010 [25]
- (5) Baustoffklasse B2  
(Brandverhalten normalentflammbar nach DIN 4102-1:1998 [22])

Darüber hinaus sollte das FVK-Gelenkbauteil mindestens über eine Dauer von 5.000 Lastspielen, d. h. ca. 10 Jahre entsprechend Lebensdauerklasse 2 für Fassadenbauteile [30, 31], belastbar sein. Innerhalb von Kapitel 5.3 wird diese Anforderung lediglich in der Prüfung der Verbundfestigkeit (Anforderungskriterium (3)) im Dauerknickversuch berücksichtigt. Die detaillierte mechanische Analyse der Betriebsfestigkeit eines FVK-Gelenkbauteils

nach bis zu 5.000 Lastspielen wird anhand zyklischer Biegeversuche in Kapitel 8 mit dem in Kapitel 5 definierten Hybridverbund durchgeführt.

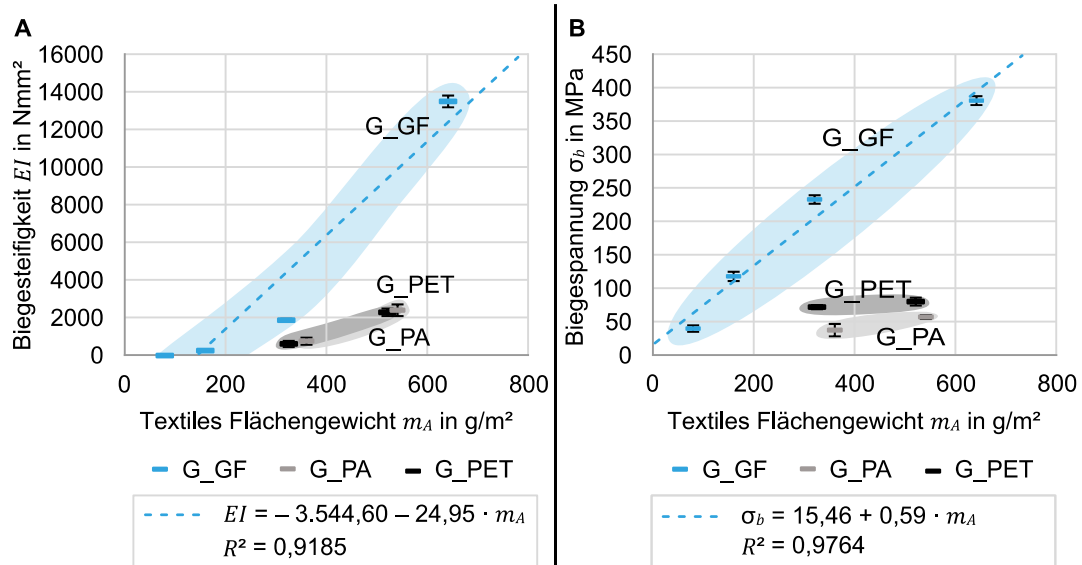
## 5.1 Steifigkeitsuntersuchung

Zunächst sollte eine möglichst hohe Steifigkeitsvariation durch das Material abgebildet werden können, damit der Gelenk- und Bauteilbereich gleichermaßen daraus herstellbar sind. In Lienhard et al. (2015) wird darauf hingewiesen, dass das Verhältnis von Biegespannung  $\sigma_b$  und E-Modul  $E$  für biege-aktive Bauteile größer als 2.500 sein sollte [69], um einen gleichzeitig flexiblen und zugfesten Gelenkbereich herzustellen. In Anbetracht der notwendigen Kosten- und Zeiteffizienz bei der Entwicklung neuer Bauteile kann im ersten Schritt vereinfacht davon ausgegangen werden, dass dieses Verhältnis eingehalten werden kann, wenn die durch die Biegebewegung auftretenden Biegespannungen  $\sigma_b$  so niedrig wie möglich sind. Dabei ist vorausgesetzt, dass lastaufnehmende Fasern integriert werden, um die widerstandsfreie Verformung des Gelenkbereichs unter Zuglast auszuschließen. Neben diesen Anforderungen an den Gelenkbereich ist zu berücksichtigen, dass aus dem Material ebenso der steife Bauteilbereich herstellbar sein muss.

Die mögliche Steifigkeitsvariation zur Erfüllung der Anforderungen an den Gelenk- und Bauteilbereich durch die Kombination der in Tab. 4.1 und Tab. 4.2 dargestellten Faser- und Matrixmaterialien wird in einer vergleichenden 2-Punkt-Biegeprüfung, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, geprüft. Obwohl die Kraft in diesem Prüfverfahren nicht unter einem konstanten Winkel eingetragen wird, kann eine vergleichende Aussage über die Biegesteifigkeit und die resultierenden Biegespannungen unter einem Biegewinkel von  $90^\circ$  getroffen werden.

Im ersten Untersuchungsschritt wird das Fasermaterial festgelegt. Wie aus Tab. 4.1 ersichtlich, werden Polyamid-, Polyester- und E-Glasfasern für die Herstellung eines FVK-Gelenkbauteils nach Materialansatz (III) in Betracht gezogen. Im VAP<sup>®</sup>-Verfahren werden alle trocken vorliegenden Fasermaterialien mit dem Matrixsystem EP135 imprägniert. Die Prüfkörper werden mit bis zu acht textilen Schichten, je nach Flächengewicht der Einzelschicht, mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  quer zur Biegeachse hergestellt. Die in der mechanischen Prüfung gemessenen Biegesteifigkeiten  $EI$  und -spannungen  $\sigma_b$  sind abhängig von dem textilen Flächengewicht  $m_A$  in Abb. 5.1 dargestellt. Die Lamine mit G\_GF weisen sowohl hinsichtlich der Biegesteifigkeit als auch bezüglich der Biegespannungen eine stetige Zunahme abhängig vom textilen Flächengewicht auf. Die Regressionsfunktionen sind in Abb. 5.1 beschrieben. Der direkte Vergleich des textilen Flächengewichtes  $m_A = 80 \text{ g/m}^2$  und  $m_A = 640 \text{ g/m}^2$  zeigt eine Steifigkeitszunahme um ca. Faktor 434.





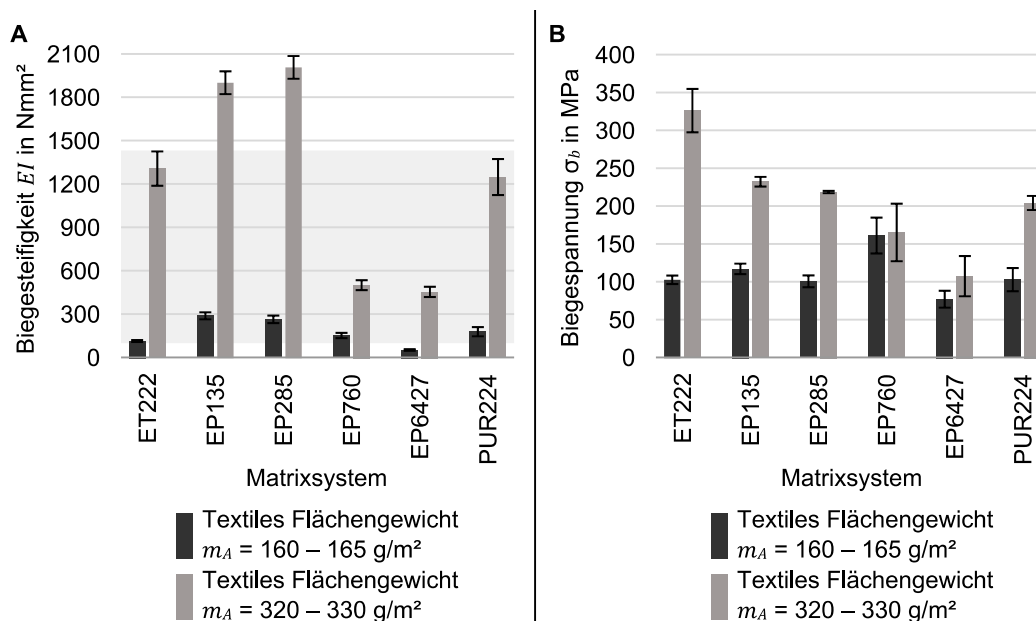
**Abb. 5.1 Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung verschiedener Fasermaterialien ( $n = 5$ );**

**A** Biegesteifigkeit  $EI$  abhängig vom textilen Flächengewicht  $m_A$  (lineare Regressionsfunktion und Bestimmtheitsmaß für G\_GF), **B** Biegespannung  $\sigma_b$  abhängig vom textilen Flächengewicht  $m_A$  (lineare Regressionsfunktion und Bestimmtheitsmaß für G\_GF).

Trotz der Imprägnierung mit einem verhältnismäßig steifen Duroplastsystem ist für eine Faserverstärkung aus G\_PA bzw. G\_PET im Vergleich zu G\_GF nur eine geringfügige Steifigkeitszunahme abhängig vom textilen Flächengewicht ersichtlich. Die Laminare aus G\_PET weisen im Vergleich zu G\_PA geringere Biegesteifigkeiten auf, wohingegen die Biegespannungen bei G\_PA niedriger sind als bei G\_PET. Der Laminaraufbau mit einer bzw. zwei oder drei Schichten (textiles Flächengewicht  $m_A = 65 - 180 \text{ g/m}^2$ ) G\_PA bzw. G\_PET kann nicht untersucht werden, da die geringe Haftung zwischen den Gewebeschichten kein Entformen ohne das Lösen der Laminatschichten voneinander erlaubt. Eine Oberflächenaktivierung würde die Anbindung an das duromere Matrixsystem verbessern. Allerdings machen die Ergebnisse deutlich, dass G\_GF prinzipiell am besten geeignet ist, um FVK mit verschiedenen Steifigkeiten in unterschiedlichen Bauteilbereichen stoffhomogen herzustellen, so dass die Oberflächenaktivierung von G\_PA und G\_PET nicht weiter betrachtet wird. Mit G\_PA bzw. G\_PET ist die Steifigkeit, die im Bauteilbereich erforderlich wäre, nicht ohne Zusatzmaterialien, bspw. versteifende Kerne, herstellbar. Dieser Ansatz entspräche jedoch Materialansatz (II) (vgl. Abb. 2.3B). Hier werden unterschiedliche Fasermaterialien in den Gelenk- und Bauteilbereich eingebracht. Dieser Ansatz wird jedoch innerhalb dieser Arbeit nicht fokussiert (vgl. Arbeitshypothese (1)), so dass E-Glasfasern als identisches Fasermaterial für den Gelenk- und Bauteilbereich ausgewählt werden.

Im zweiten Schritt werden die in Tab. 4.2 gelisteten duromeren Matrixsysteme unabhängig von der Elastomerschicht (HHZ99 bzw. HHZ82) untersucht. Alle Prüfkörper, bis auf ET222, sind mit G\_GF als Faserverstärkung hergestellt. Aufgrund der Aufmachungsform

ist in ET222 bereits Glasgewebe enthalten. Es werden zwei Prüfkörperarten für die Überprüfung der möglichen Steifigkeitsvariation durch das Matrixsystem hergestellt: Zum einen werden Prüfkörper mit zwei bzw. vier Schichten G\_GF (textiles Flächengewicht  $m_A = 160\text{g/m}^2$  bzw.  $m_A = 320\text{g/m}^2$ ) und dem jeweiligen Matrixsystem im VAP<sup>®</sup>-Verfahren hergestellt, zum anderen ein bzw. zwei Schichten ET222 (textiles Flächengewicht  $m_A = 165\text{g/m}^2$  bzw.  $m_A = 330\text{g/m}^2$ ) im Heißpressverfahren miteinander verpresst. Die Ergebnisse der vergleichenden 2-Punkt-Biegeprüfung sind in Abb. 5.2 dargestellt.



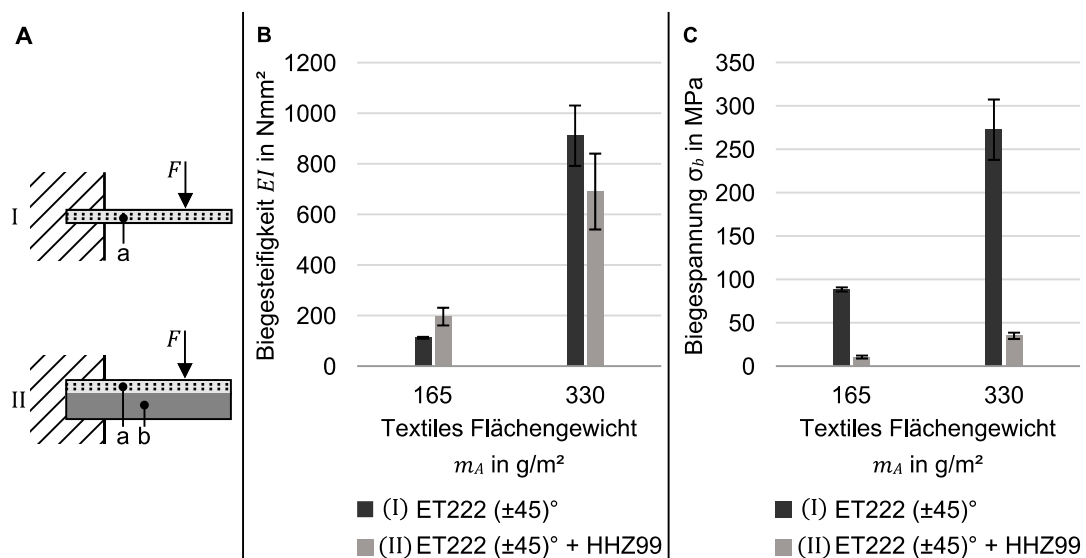
**Abb. 5.2 Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung verschiedener Matrixsysteme mit grauer Hinterlegung der möglichen Steifigkeitsvariation durch ET222 ( $n = 5$ );**

**A** Biegesteifigkeit  $EI$  abhängig von Matrixsystem und textilem Flächengewicht  $m_A$ , **B** Biegespannung  $\sigma_b$  abhängig von Matrixsystem und textilem Flächengewicht  $m_A$ .

Für die niedrigmoduligen Matrixsysteme (EP760 und EP6427) sind trotz Verdoppelung des textilen Flächengewichts die geringsten Steifigkeitsänderungen feststellbar (vgl. Abb. 5.2A). Die Matrixsysteme EP135, EP285 weisen bei beiden textilen Flächengewichten ähnlich hohe Steifigkeiten auf während die Steifigkeiten von ET222 und PUR224 bei  $m_A = 320 - 330\text{g/m}^2$  auf einem mittleren Niveau liegen. Die geringeren Steifigkeiten bei höherem textilen Flächengewicht von ET222 sind bedingt durch den im Heißpressprozess realisierbaren Fasergewichtsanteil. Bei ET222 liegt dieser bei ca. 60 %, bei den im VAP<sup>®</sup>-Prozess hergestellten Laminaten EP135 und EP285 dagegen nur bei ca. 50 %. Der Anteil des entropieelastischen Matrixsystems, das die Steifigkeit maßgeblich bedingt, ist entsprechend höher und folglich auch die Steifigkeit. Die geringste Steifigkeit der höhermoduligen Matrixsysteme lässt sich mit ET222 abbilden. Die Biegesteifigkeit von ET222 liegt mit  $EI = 119,53\text{ Nmm}^2$  zwischen EP760 ( $EI = 157,57\text{ Nmm}^2$ ) und EP6427 ( $EI = 57,5\text{ Nmm}^2$ ). Der Steifigkeitsbereich, der einschließlich der berücksichtigten Standard-

abweichung von ET222 abgedeckt wird, ist in Abb. 5.2A grau hinterlegt. ET222 bietet darüber hinaus den Vorteil der Verarbeitung im Pressprozess, wodurch kürzere Taktzeiten als mit Infusionsharzen, die im VAP<sup>®</sup>-Prozess verarbeitet werden, möglich sind. Aufgrund der Möglichkeit Laminats mit verhältnismäßig geringen Steifigkeiten und ebenso Laminats mit höheren Steifigkeiten in einem wirtschaftlichen Herstellungsprozess zu produzieren, wird ET222 ausgewählt.

Im letzten Schritt der Überprüfung der Steifigkeitsvariation werden, vergleichend zu den in Abb. 5.2 dargestellten Ergebnissen für ET222, Laminats mit einer bzw. zwei Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  (textiles Flächengewicht  $m_A = 165 \text{ g/m}^2$  bzw.  $m_A = 330 \text{ g/m}^2$ ) und einer Schicht Elastomer HHZ99 hergestellt. Der Laminataufbau bzw. die Einspannungsrichtung während der Prüfung ist in Abb. 5.3A dargestellt. Für die Prüfkörper mit HHZ99 liegt die HHZ99-Schicht in der 2-Punkt-Biegeprüfung unten (Druckseite) und die Faserverstärkung aus ET222 oben (Zugseite). Die Auswirkung der Elastomerschicht auf die resultierenden Biegesteifigkeiten  $EI$  und Biegespannungen  $\sigma_b$  ist in Abb. 5.3B und C dargestellt.



**Abb. 5.3 Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung ET222 mit/ohne Elastomerverstärkung (HHZ99) ( $n = 5$ );** A Ausrichtung der Einzelschichten des Laminats relativ zur eingetragenen Kraft  $F$  mit (I) Prüfkörper ohne HHZ99 und (II) Prüfkörper mit HHZ99 und (a) ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  (Dicke einer Schicht ET222  $h_{\text{ET222}} = 0,12 \text{ mm}$ ) und (b) HHZ99 (Dicke einer Schicht ET222  $h_{\text{HHZ99}} = 0,49 \text{ mm}$ ), B Biegesteifigkeit  $EI$  abhängig von Elastomer und textilem Flächengewicht  $m_A$ , C Biegespannung  $\sigma_b$  abhängig von Elastomer und textilem Flächengewicht  $m_A$ .

Durch die Einbringung der Elastomerschicht wird die Biegesteifigkeit  $EI$  nicht signifikant verändert. Die Biegespannung  $\sigma_b$  wird durch die Einbringung der Elastomerschicht reduziert. Ursächlich ist die Vergrößerung der Querschnittsfläche des Prüfkörpers bei gleichzeitig keiner signifikanten Steifigkeitsänderung. In der Berechnung der Biegespannung

wird die Querschnittsfläche des Prüfkörpers berücksichtigt (vgl. Formel (4.1)). Die tatsächlich wirkende Kraft verändert sich nicht signifikant, sofern mindestens zwei Schichten ET222 mit einem textilen Flächengewicht  $m_A = 330 \text{ g/m}^2$  im Laminat vorhanden sind (vgl. Tab. 5.1).

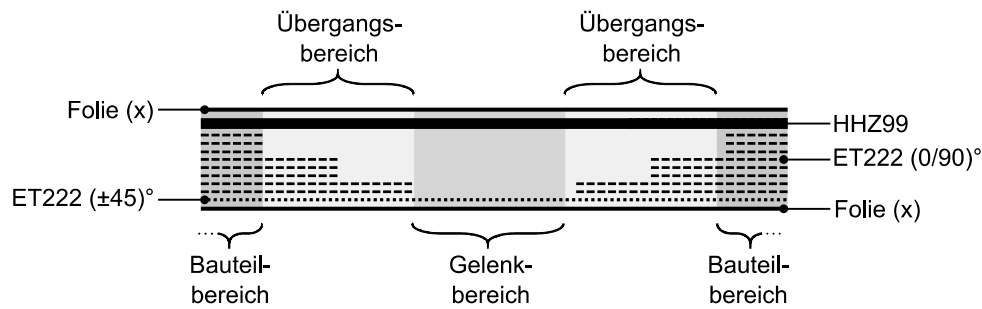
**Tab. 5.1 Max. Biegekraft  $F_{max}$  unter 2-Punkt-Biegung mit/ohne Elastomerschicht (HHZ99) ( $n = 5$ ); Laminataufbauten und Ausrichtung der Prüfkörper analog zu Abb. 5.3.**

		ET222	ET222 und HHZ99	ET222	ET222 und HHZ99
		Textiles Flächengewicht 165 g/m <sup>2</sup>		Textiles Flächengewicht 330 g/m <sup>2</sup>	
$F_{max}$	in N	1,35 ± 0,04	2,35 ± 0,35	9,43 ± 1,20	9,78 ± 0,99

Bezugnehmend auf Kapitel 2.2 bzw. Abb. 2.3 und Arbeitshypothese (1) kann bereits auf Basis der bisherigen Auswahl von Faser, Matrix und Elastomer festgestellt werden, dass mit der Kombination aus ET222 und HHZ99 kein Materialansatz (III) mit konstanter Dicke über die gesamte Querschnittsfläche des FVK-Gelenkbauteils herstellbar ist. Die Steifigkeit im Bauteilbereich muss über mehrere Schichten ET222 realisiert werden, so dass sich unterschiedliche Laminatdicken im Gelenk- und Bauteilbereich einstellen. In den Beschreibungen zu Materialansatz (II) (vgl. Abb. 2.3B) ist bereits festgehalten, dass der Übergang zwischen dem Bauteil- und Gelenkbereich in einem solchen Fall gradiert werden muss, um die auftretenden Beanspruchungen im Material zu reduzieren [16]. Dieser Aspekt wird in die nachfolgenden Untersuchungen als Erweiterung zu Materialansatz (III) aufgenommen.

## 5.2 Oberflächenkaschierung und Witterungsbeständigkeit

Aufgrund des ausgewählten Matrixsystems in ET222, einem auf Bisphenol A basierendem Epoxidharz, muss eine Oberflächenkaschierung zum Schutz des FVK-Gelenkbauteils gegen die Witterungseinflüsse bei dem Einsatz als Außenfassadenbauteil aufgebracht werden. Anderenfalls würde der GFK unter der einwirkenden UV-Strahlung vergilben, und die Festigkeit würde reduziert werden [36, 56, 84, 101]. Die in Tab. 4.3 aufgeführten Oberflächenkaschierungen werden zunächst mit ET222 und HHZ99 unter den in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Konditionen verpresst. Der verwendete Laminataufbau wurde innerhalb von Voruntersuchungen außerhalb dieser Arbeit [12, 13, 62, 91, 94] als geeignet für die Herstellung von FVK-Gelenkbauteilen bestimmt und ist in Abb. 5.4 dargestellt. Der 10 mm breite Gelenkbereich wird durch eine Schicht ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$ , die über das gesamte Gelenkbauteil eingebracht wird, verstärkt. Im Bauteilbereich sind zusätzlich acht versteifende Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  eingebracht. Im 10 mm breiten Übergangsbereich enden diese Schichten stufenweise mit einer Schrittweite von 5 mm.

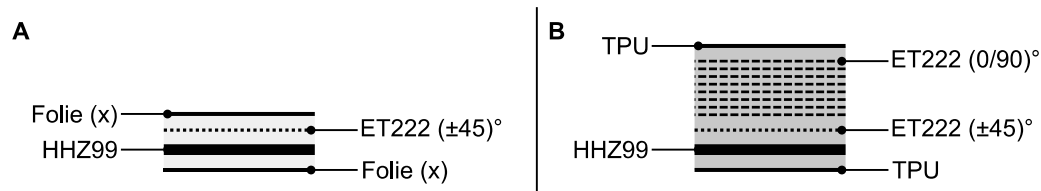


**Abb. 5.4 Schematischer Laminataufbau des Gelenkbauteil-Prüfkörpers (Geometrie vor dem Pressprozess) für die Auswahl der Oberflächenkaschierung und Prüfung der Witterungsbeständigkeit.**

Das Verhältnis der Dicken im Bauteilbereich ( $h = 2 \text{ mm}$ ) und Gelenkbereich ( $h = 1 \text{ mm}$ ) beträgt somit 2:1. Ein aus Teflon bestehender Einleger formt die unterschiedlichen Dicken des Gelenkbauteils ab, wobei Elastomer und Folie tiefgezogen werden. Das  $(\pm 45)^\circ$  orientierte Prepreg darf nicht auf der Seite eingebracht werden, auf der die Materialien aufgrund der unterschiedlichen Laminatdicke im Gelenk- und Bauteilbereich tiefgezogen werden. Das Gewebe wird in dem Fall verstreckt und die verbleibende Materialdehnung ist unzureichend, um eine Biegebewegung umzusetzen. Das Gelenkbauteil versagt infolgedessen im Gelenk- oder Übergangsbereich.

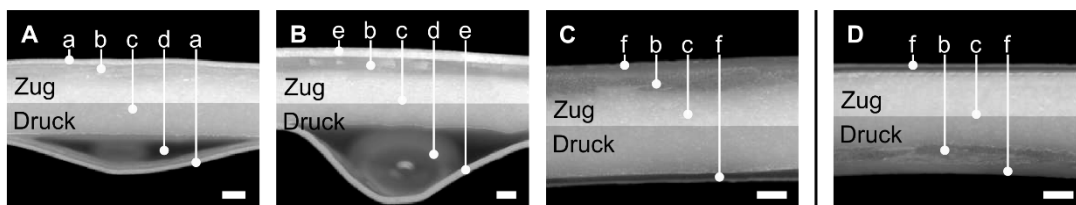
Nach einer Sichtprüfung hinsichtlich der Haftung der Folien auf den zwei Seiten des Gelenkbauteils, d. h. einerseits zu HHZ99 und andererseits zu ET222, werden die Gelenkbauteile 30 Mal händisch um  $180^\circ$  zu- und aufgefaltet. Anschließend erfolgt eine zweite Sichtprüfung hinsichtlich der Faltenbildung durch die Biegebewegung. Von allen in Tab. 4.3 aufgeführten Materialien sind, nach diesem ersten Vorversuch, nur F\_LDPE, TPU und TPC für die Kaschierung geeignet und in weiteren Prüfungen zu betrachten. Die Kaschierfolien PVC und F\_PET zeigen eine zu geringe Haftung an ET222 bzw. HHZ99 oder eine starke Faltenbildung beim Biegen des Gelenkbauteils.

Zur Überprüfung der interlaminaren Haftung der Kaschierfolien F\_LDPE, TPU und TPC werden Lamine mit diesen Folien im Dauerknickversuch (vgl. Kapitel 4.3.3) untersucht. Die Lamine werden 5.000 Lastspiele geknickt und mögliche Ablöseeffekte der Kaschierfolien durch das Wechsellastspiel unter dem Auflichtmikroskop optisch beurteilt. Der Laminataufbau der Dauerknickprüfkörper ist in Abb. 5.5A dargestellt. Er entspricht dem Gelenkbereich des Laminataufbaus in Abb. 5.4 und wird jeweils mit einer der drei Folien hergestellt und geprüft.



**Abb. 5.5 Schematischer Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs für die Ermittlung der Oberflächenkaschierung mit den untersuchten Folien (x);**  
**A** Gelenkbereich (Textiles Flächengewicht  $m_A = 165 \text{ g/m}^2$ ),  
**B** Bauteilbereich (Textiles Flächengewicht  $m_A = 1.485 \text{ g/m}^2$ ).

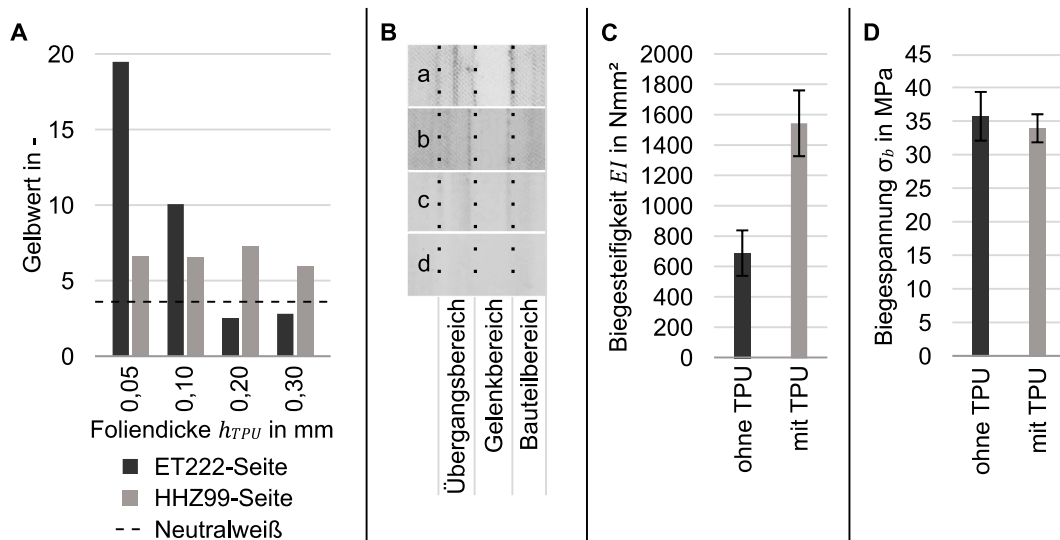
Es erfolgt die Analyse der Faltenbildung und möglicher Ablöseeffekte durch Mikroskopieaufnahmen von Schlibfbildproben unter dem Auflichtmikroskop. Der Vergleich von Abb. 5.6A, B und C zeigt deutlich, dass bei der Biegebelastung mit HHZ99 auf der Druckseite lediglich bei TPU keine Ablöseeffekte auftreten (vgl. Abb. 5.6C). Die Haftung zu ET222 ist aufgrund der hohen Polarität des Epoxidsystems bei allen Foliensystemen erwartungsgemäß gut. Allerdings erfüllt nur TPU die Anforderung an Haftung und Faltenbildung für beide Seiten des Laminats (vgl. Abb. 5.6D). Es ist anzunehmen, dass die Ablöseeffekte auf der HHZ99-Seite bei F\_LDPE und TPC hauptsächlich durch die unterschiedlichen Dehngrenzen der Folien im Vergleich zu HHZ99 verursacht werden.



**Abb. 5.6 Mikroskopieaufnahmen (Auflichtmikroskop) von in Schlibfbildproben eingebetteten Dauerknickprüfkörpern (Laminataufbau analog zu Abb. 5.5A,  $n = 5$ ) nach 5.000 Lastspielen Dauerknickversuch (Maßstab 0,2 mm) mit markierter Zug- und Druckseite;**  
**A** Dauerknickprüfkörper mit (a) F\_LDPE, (b) ET222 ( $\pm 45^\circ$ ), (c) HHZ99, (d) Ablösung durch Knickversuch und Lufteinschluss im Einbettungsharz der Schlibfbildprobe, **B** Dauerknickprüfkörper mit (e) TPC, (b) ET222 ( $\pm 45^\circ$ ), (c) HHZ99, (d) Ablösung durch Knickversuch und Lufteinschluss im Einbettungsharz der Schlibfbildprobe, **C** Dauerknickprüfkörper mit (f) TPU, (b) ET222 ( $\pm 45^\circ$ ), (c) HHZ99, **D** Dauerknickprüfkörper mit (f) TPU, (b) ET222 ( $\pm 45^\circ$ ), (c) HHZ99.

Im nächsten Schritt wird die Foliendicke bestimmt, da optische Sichtprüfungen der Dauerknickprüfkörper zeigen, dass TPU in der Dicke von  $h_{TPU} = 0,05 \text{ mm}$  keine ausreichend deckenden Eigenschaften besitzt, um die Anforderungen an eine opake, weiße Oberfläche im Hinblick auf die Anwendung als Fassadenbauteil zu erfüllen (vgl. Abb. 5.7B, Probe a). Zur Bestimmung einer ausreichenden Foliendicke unter Berücksichtigung der Deckkraft und des Weißgrades werden vergleichende Sichtprüfungen und Gelbwertmessungen nach DIN 6167 [19] (vgl. Kapitel 4.3.8) durchgeführt. Auf die Oberfläche wird TPU in unterschiedlichen Stärken (0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,3 mm) aufgebracht, indem mehrere Folien

mit einer Einzelschichtdicke von  $h_{TPU} = 0,05$  mm geschichtet werden. Der Laminataufbau der untersuchten Gelenkbauteile ist aus Abb. 5.4 nachzuvollziehen.



**Abb. 5.7 Bestimmung der Foliendicke abhängig von Gelbwert und Deckkraft;**

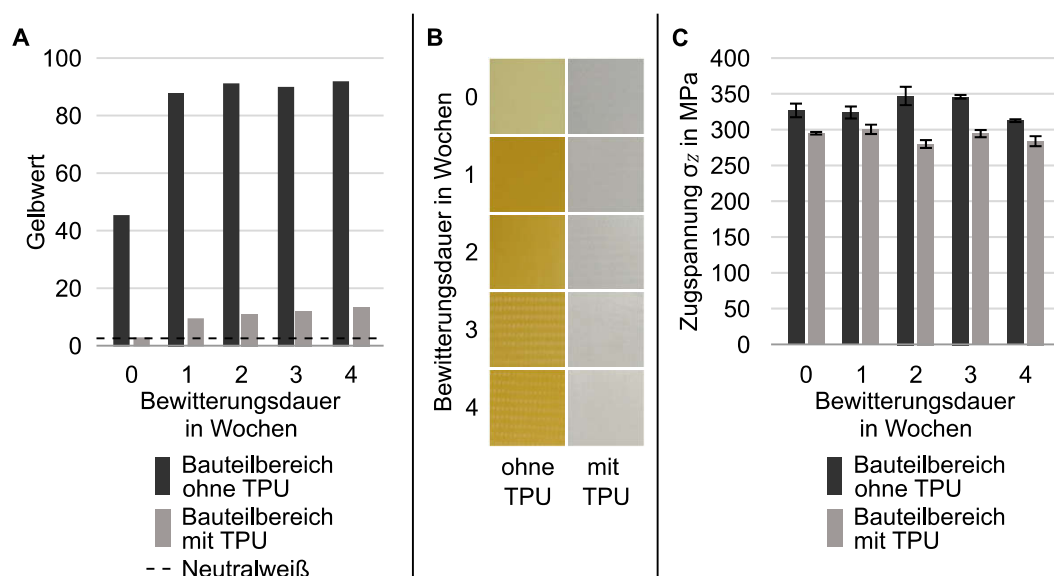
**A** Ergebnisse der Gelbwertmessung nach DIN 6167 [19] an Gelenkbauteilen mit einem Laminataufbau entsprechend Abb. 5.4 auf der ET222- bzw. HHZ99-Seite des Gelenkbauteils in Abhängigkeit von unterschiedlichen Foliendicken ( $n = 3$ ), **B** Sichtprüfung der Deckkraft mit Foliendicken  $h_{TPU}$  von (a) 0,05 mm (b) 0,1 mm (c) 0,2 mm und (d) 0,3 mm ( $n = 1$ ), **C** Biegesteifigkeit  $EI$  ermittelt in vergleichender 2-Punktbiegeprüfung mit/ohne TPU ( $h_{TPU} = 0,3$  mm) ( $n = 5$ ), **D** Biegespannung  $\sigma_b$  ermittelt in vergleichender 2-Punkt-Biegeprüfung mit/ohne TPU ( $h = 0,3$  mm) ( $n = 5$ ).

Die Ergebnisse der Gelbwertmessung sind in Abb. 5.7A im Vergleich zu Neutralweiß (Gelbwert = 3,66 und  $X = 85,054$ ,  $Y = 89,859$ ,  $Z = 93,443$ ) dargestellt. Das Spektralphotometer berechnet aus drei vermessenen Punkten automatisch einen Mittelwert, so dass es sich bei den dargestellten Werten um Mittelwerte handelt, aber keine Streuung in Abb. 5.7A dargestellt werden kann. Auf der Laminatseite mit HHZ99 tritt keine signifikante Veränderung des Gelbwertes abhängig von der TPU-Dicke auf. Ursächlich ist die weiße Farbe des Elastomers im Vergleich zu dem gelblichen Epoxidharz. Auf der Laminatseite mit ET222 ist, ab einer Dicke von 0,2 mm, ebenfalls kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Gelbwertes festzustellen. Jedoch zeigt die gleichzeitige Betrachtung der Deckkraft (vgl. Abb. 5.7B), dass eine Foliendicke von 0,3 mm notwendig ist, um eine ausreichende Deckkraft auf der FVK-Seite des Gelenkbauteils zu erzielen. Erst ab dieser Foliendicke sind die einzelnen Abstufungen der ET222-Schichten im Übergangsbereich nicht erkennbar.

Auf Basis dieser Ergebnisse wird die Dicke der TPU-Kaschierung auf  $h_{TPU} = 0,3$  mm festgelegt. Abschließend werden die Biegeeigenschaften des Gelenkbereichs mit und ohne TPU-Kaschierung in einer vergleichenden 2-Punkt-Biegeprüfung (vgl. Kapitel 4.3.1) untersucht. Hierzu werden Prüfkörper mit dem Materialaufbau des Gelenkbereichs analog

zu Abb. 5.5A hergestellt. Die Prüfkörpereinspannung entspricht Abb. 5.3A mit HHZ99 auf der Druckseite bei der Biegebewegung. Es ist erkennbar, dass die Biegesteifigkeit  $EI$  durch die Einbringung der TPU-Schichten erhöht wird. Die auftretenden Biegespannungen unterscheiden sich zwischen den beiden Prüfkörpern allerdings nicht signifikant (vgl. Abb. 5.7D). Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Belastung im Material nicht erhöht, und die Betriebsfestigkeit eines FVK-Gelenkbauteils durch die Kaschierung nicht nachteilig beeinflusst wird. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die TPU-Kaschierung mit einer Dicke  $h_{TPU} = 0,3$  mm eine ausreichend gute Haftung für 5.000 Knickungen, einen ausreichenden Weißgrad und ebenso eine ausreichende Deckkraft aufweist, ohne die Biegeeigenschaften im Gelenkbereich nachteilig zu beeinflussen.

Die Eignung des TPUs mit einer Schichtdicke von  $h_{TPU} = 0,3$  mm zum Schutz des GFK vor Vergilben durch UV-Strahlung und Festigkeitsverlust wird durch eine erneute Gelbwertmessung nach DIN 6167 [19] und eine Zugprüfung nach DIN EN ISO 527 [20] (vgl. Kapitel 4.3.4) im Anschluss an die Umweltsimulation (vgl. Kapitel 4.3.8) geprüft. Der Laminataufbau entspricht dem Bauteilbereich in Abb. 5.4 bzw. der separaten Darstellung des Bauteilbereichs in Abb. 5.5B mit und ohne beidseitig aufgebracht TPU. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind in Abb. 5.8 dargestellt.



**Abb. 5.8 Gelbwertmessung und Zugprüfung von mit/ohne TPU ( $h = 0,3$  mm) bewitterten Laminaten (Aufbau entsprechend Abb. 5.5B) ( $n = 5$ );**

**A** Gelbwertmessung nach DIN 6167 [17] in Abhängigkeit von der Bewitterungsdauer, **B** Optische Sichtprüfung der Farbänderung, **C** Zugfestigkeit  $\sigma_z$  abhängig von der Bewitterungsdauer nach DIN EN ISO 527 [20].

In Abb. 5.8A ist die starke Vergilbung des Materials auf der ET222-Seite nach vier Wochen Bewitterungsdauer zu erkennen. Der Gelbwert steigt von 45,67 auf 92,18. Das entspricht einer Steigerung von ca. 100 %. Für den mit TPU kaschierten Laminataufbau ist sogar eine



Steigerung des Gelbwertes um ca. 285 % zu beobachten. Allerdings liegt der Gelbwert nach vier Wochen bei ca. 13,7 im Vergleich zu den ursprünglichen 3,56. Der Gelbwert von Neutralweiß liegt bei 3,66. In der optischen Sichtprüfung ist diese Veränderung kaum merklich sichtbar (vgl. Abb. 5.8B), so dass der Schutz vor Vergilbung und Farbänderung mit TPU ( $h = 0,3$  mm) als erfüllt anzusehen ist.

Bei der Analyse der Zugfestigkeiten in Abb. 5.8C gilt es zu beachten, dass hier die ertragbare Kraft der Prüfkörper auf die Querschnittsfläche bezogen wird. Die Dicke der Prüfkörper mit TPU ist größer als die der Prüfkörper ohne TPU. Die ertragbare Kraft der beiden Referenzprüfkörper (Woche 0) ist mit  $F_{max(\text{mit TPU})} = 14,37 \pm 0,16$  GPa bzw.  $F_{max(\text{ohne TPU})} = 14,55 \pm 0,53$  GPa gleich. Die Analyse der Zugspannung  $\sigma_z$  hinsichtlich eines möglichen Festigkeitsverlustes basierend auf den in Abb. 5.8C dargestellten Werten ist, aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den Stichproben, jedoch wenig aufschlussreich.

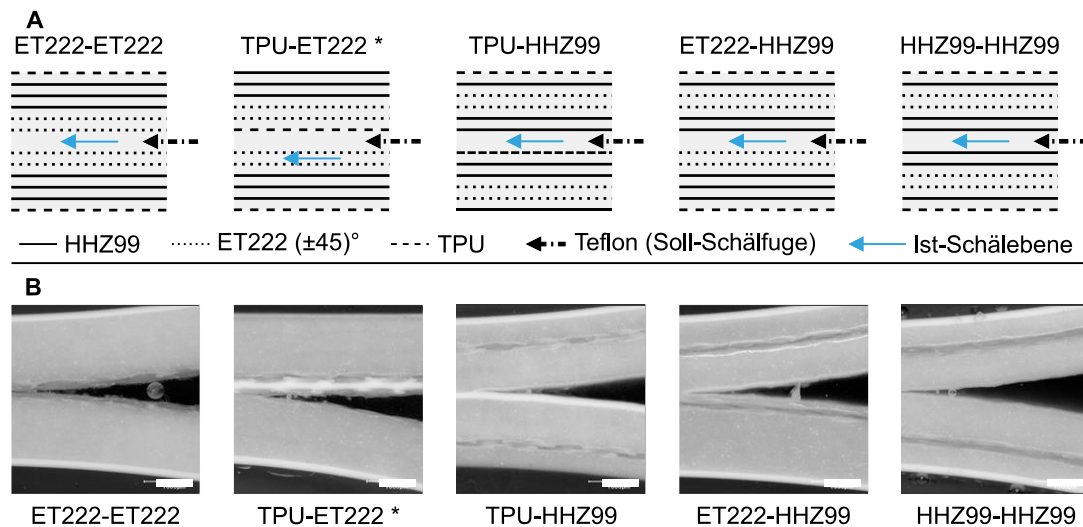
Daher wird eine ANOVA vergleichend für die Messwerte der Referenz (Woche 0) und den Messwerten der Woche 4 durchgeführt, um festzustellen, ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Messwerten in Abhängigkeit von der Bewitterungsdauer besteht. Für die Prüfkörper ohne TPU liefert die ANOVA einen p-Wert  $< 0,000$ , wodurch die Nullhypothese abgelehnt werden muss. Für diese Prüfkörper sind nicht alle Mittelwerte gleich. Nähere Betrachtungen eventueller linearer Zusammenhänge zeigen eine leichte Abnahme der Zugfestigkeit über die vier Wochen Bewitterungsdauer. Für die Prüfkörper mit TPU liefert die ANOVA einen p-Wert  $= 0,836$ , so dass die Nullhypothese angenommen werden kann. Hier sind alle Mittelwerte gleich, und die Festigkeit des Laminats verändert sich durch die Oberflächenkaschierung mit TPU nicht. Die Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit für ein Fassadenbauteil im Hinblick auf einen möglichen Festigkeitsverlust werden folglich durch das Aufbringen des TPUs mit einer Dicke  $h_{TPU} = 0,3$  mm neben den optischen Anforderungen ebenfalls erfüllt.

### 5.3 Verbundfestigkeit unter Mode I-Belastung

Für die dauerhafte, zyklische Belastung des Hybridverbunds ist insbesondere die interlaminaire Haftung zwischen den drei verschiedenen Materialien (HHZ99, ET222 und TPU) von Bedeutung. Durch die zyklische Biegebelastung würde im Anwendungsfall bei einer unzureichenden interlaminaren Haftung Delaminationsversagen auftreten.

Die HHZ99-Schicht, deren Schichtdicke ca. vier Mal so hoch ist wie die von ET222, determiniert die Steifigkeitseigenschaften verhältnismäßig dünner Hybridverbund-Lamine. Bei geringer Anzahl ET222-Schichten sind die Lamine daher relativ flexibel. Um auf eine Vielzahl versteifender ET222-Schichten im Laminataufbau zu verzichten und die Prüfung so materialeffizient wie möglich auszuführen, wird daher eine T-Schälprüfung für

flexible Fügebauteile nach DIN EN ISO 11339:2010 [26] durchgeführt (vgl. Kapitel 4.3.5). Die Laminataufbauten für die Prüfung sind in Abb. 5.9A dargestellt.



**Abb. 5.9** Prüfkörper für T-Schälprüfung nach DIN EN ISO 11339:2010 [26];

**A** Schematische Darstellung der Laminataufbauten der Prüfkörper im T-Schälversuch mit markierter Soll-Schälfuge (Teflon) und Ist-Schälfuge (blauer Pfeil) (\*Schälung bei TPU-ET222 nicht in der Soll-Schälfuge), **B** Mikroskopieaufnahmen der Schälgefüge in den Prüfkörpern anhand von Schliffbildproben unter einem Auflichtmikroskop (Maßstab 1 mm) (\*Schälung bei TPU-ET222 nicht in der Soll-Schälfuge).

Es werden alle Materialien zueinander geprüft, die auch im realen Gelenkbauteil aufeinander liegen könnten. Dementsprechend findet keine Prüfung von TPU zu TPU statt. Zwei Laminataufbauten mit der gleichen Anzahl Einzelschichten ET222, HHZ99 und TPU werden im Pressprozess gefügt. Die Anzahl der Einzelschichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  ist so gewählt, dass die Festigkeit des zu schälenden Laminats die Trennkraft nicht unterschreitet. Im Gegensatz zu der Prüfung der interlaminaren Haftung von FVK nach ASTM D5528-13 [8] wird bei der Prüfung nach DIN EN ISO 11339:2010 [26] die gemessene Schälkraft von den Biegeeigenschaften der Fügebauteile beeinflusst. Folglich wird die Anordnung der Schichten in den beiden Fügebauteilen so wenig wie möglich verändert und die steiferen Schichten (ET222) werden möglichst nah an der biege-neutralen Ebene platziert. Die Soll-Schälfuge ist in der schematischen Darstellung anhand der mit den Einzelschichten verpressten Teflonschicht und einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet. Die Ist-Schälfuge, die ebenso in den Mikroskopieaufnahmen der Schliffbildproben zu sehen ist (Abb. 5.9B), ist durch den zweiten (blauen) Pfeil der schematischen Darstellung markiert.

Abgesehen von der Materialpaarung ET222 und TPU tritt bei allen Laminaten die Schälung in der Soll-Schälfuge auf. Durch die formschlüssige, mechanische Verankerung des TPUs in der Gewebestruktur von ET222 (vgl. Abb. 5.10) ist die notwendige Schälkraft größer als

die Zugfestigkeit von ET222 ( $\pm 45^\circ$ ) bzw. als die mittlere Trennkraft zwischen zwei Schichten ET222 ( $\pm 45^\circ$ ).

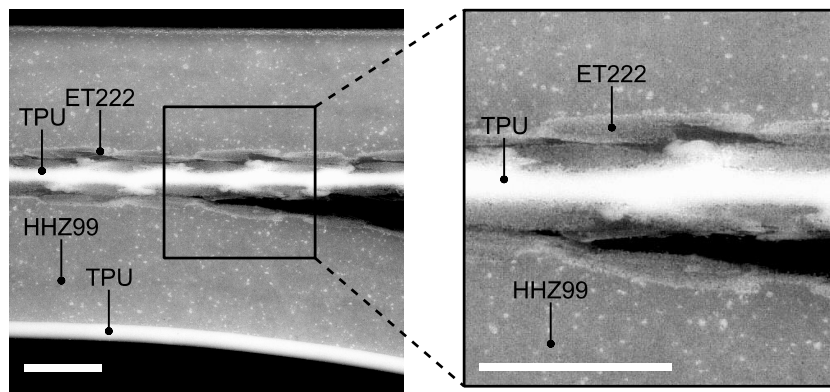


Abb. 5.10 Mikroskopieaufnahme (Auflichtmikroskop) einer Schlibbildprobe eines Schälprüfkörpers TPU-ET222 und sichtbarem Formschluss zwischen den zwei Fügepartnern (Maßstab 1 mm).

In dem Kraft-Weg-Diagramm in Abb. 5.11A ist je Prüfkörperart eine exemplarische Kurve dargestellt. Der Verlauf der Kurve von TPU-ET222 zeigt den initialen Anstieg der Trennkraft bis die ET222-Schicht mit einer Faserorientierung von ( $\pm 45^\circ$ ) reißt und die Schälung zwischen den zwei angrenzenden ET222-Schichten auftritt (vgl. Abb. 5.9A und B bzw. Abb. 5.10).

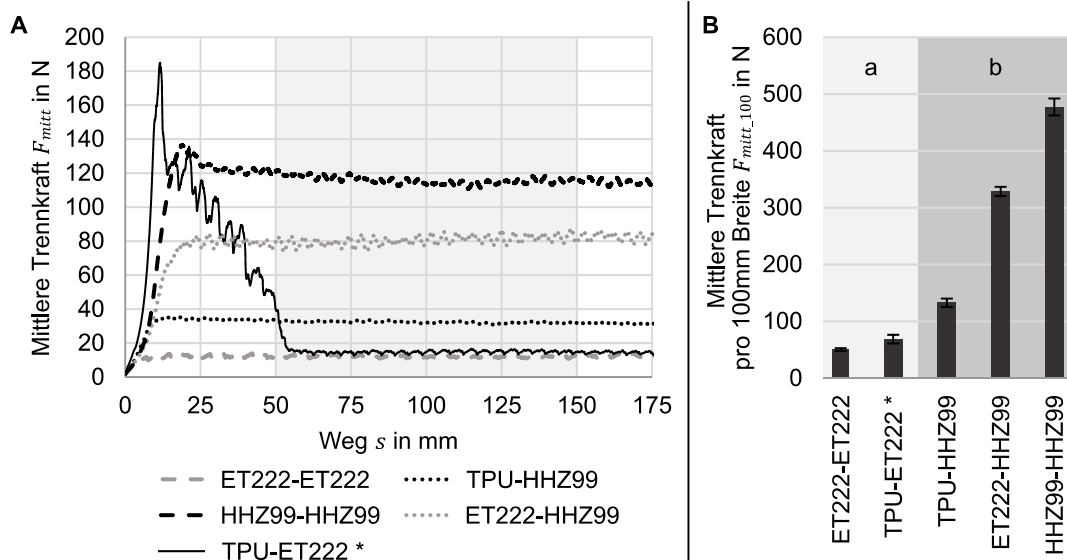


Abb. 5.11 Ergebnisse der T-Schälprüfung nach DIN EN ISO 11339:2010 [26] ( $n = 10$ );

**A** Kraft-Weg-Diagramm jeweils eines Schälprüfkörpers mit grau hinterlegtem Bereich für die Auswertung der mittleren Trennkraft (50 bis 150 mm)  $F_{mitt}$  bei Prüfkörperbreite  $b = 25$  mm, **B** Mittlere Trennkraft bezogen auf 100 mm Breite  $F_{mitt,100mm}$  (\*Schälung bei TPU-ET222 zwischen zwei Schichten ET222) mit den Versagensarten (a) Adhäsionsbruch und (b) Kohäsionsbruch nach [43].

Die mittlere Trennkraft  $F_{mitt\_100mm}$  bezogen auf 100 mm Prüfkörperbreite (vgl. Abb. 5.11B) zeigt darüber hinaus, dass die Haftung zwischen allen Einzelschichten des Hybridverbunds größer ist als die Haftung zwischen zwei Schichten ET222 ( $F_{mitt\_100mm(ET222-ET222)} = 50,38 \text{ N}$ ). Die höheren Trennkraften bei den Prüfkörpern mit HHZ99 als Fügepartner ist auf den auftretenden Kohäsionsbruch [43] zurückzuführen, bei dem Teile der HHZ99-Schicht an der gegenüberliegenden Schicht haften bleiben. Infolge der höheren Trennkraften zwischen allen übrigen Fügepartnern im Vergleich zu dem reinen GFK (ET222-ET222) kann für den Hybridverbund aus TPU, HHZ99 und ET222 angenommen werden, dass trotz Verbindung unterschiedlicher Materialien eine ausreichend gute interlaminaire Haftung für die Herstellung eines FVK-Gelenkbauteils besteht.

## 5.4 Temperaturstabilität

Aufgrund der Einsatztemperaturen von Außenfassadenbauteilen in der Klimazone Mitteleuropa von  $-20 \text{ °C}$  bis  $+80 \text{ °C}$  entsprechend DIN 18516-1:2010 [25] muss die Glasübergangstemperatur des Hybridverbunds außerhalb dieses Temperaturbereichs liegen. Anderenfalls würden sich die Festigkeitseigenschaften des Hybridverbunds während des Einsatzes unkontrolliert verändern. Duroplaste sind bis zur Glasübergangstemperatur energieelastisch, das bedeutet sie sind hart und spröde und widerstehen mechanischen Verformungen. Oberhalb der Glasübergangstemperatur zeigen sie ein gummielastisches Verhalten, sprich sie verformen sich bei Entlastung wieder in den für die Makromoleküle entropisch günstigsten Fall zurück. Bei elastomeren Materialien verhält es sich anders herum: Unterhalb der Glasübergangstemperatur sind sie energieelastisch und oberhalb der Glasübergangstemperatur entropieelastisch. Im entropieelastischen Bereich wird der ungeordnete Molekülkettenzustand angestrebt. Wird das elastomere Bauteil verformt, so werden die Molekülketten gestreckt und nach der Entlastung wiederum der ungeordnete Zustand angestrebt, so dass das elastomere Bauteil sich in den Ausgangszustand zurück verformt [2]. Unterhalb der Glasübergangstemperatur widerstehen sie mechanischen Verformungen und sind spröde. Folglich ist für das Gelenkbauteil die Glasübergangstemperatur der Elastomerschicht als besonders kritisch zu betrachten, um ein sprödes Brechen des Gelenkbereichs durch Bewegung im Einsatzfall zu vermeiden.

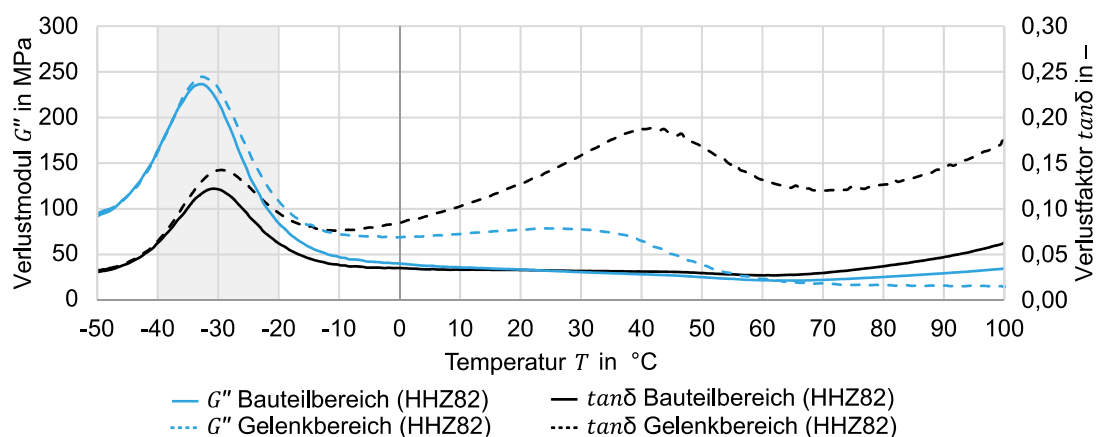
Die Glasübergangstemperatur wird nach DIN EN ISO 6721-2 [35] (vgl. Kapitel 4.3.6) ermittelt. In Tab. 5.2 sind die ermittelten Temperaturen für die Glasübergangstemperatur der Materialien für beide Bestimmungsverfahren ( $G''$  und  $\tan\delta$ ) dargestellt. Aufgrund der relativ hohen Glasübergangstemperatur von HHZ99 erfüllen der Gelenk- und Bauteilbereich aus diesem Material in Kombination mit TPU und ET222 die Anforderungen an die Glasübergangstemperatur für Außenfassadenbauteile nicht.

**Tab. 5.2 Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) der Materialien im Hybridverbund, bestimmt nach DIN EN ISO 6721-2 [35] ( $n = 3$ ); Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs analog zu Abb. 5.5 mit HHZ99 oder HHZ82.**

	$T_g$ nach Max. $G''$ in °C	$T_g$ nach Max. $\tan\delta$ in °C	Mittelwert in °C	Einhaltung Anforderungs- kriterium $T_g > (-20 \text{ °C bis } +80 \text{ °C}) < T_g$
ET222	138,67 ± 4,93	146,00 ± 1,00	142,34	✓
TPU	11,01 ± 1,92	34,10 ± 3,78	22,56	-
HHZ99	-9,03 ± 1,04	0,16 ± 1,23	-4,44	-
Gelenkbereich HHZ99	-5,42 ± 0,83	-2,80 ± 0,75	-4,11	-
Bauteilbereich HHZ99	-6,34 ± 0,72	-4,75 ± 1,03	-5,55	-
Gelenkbereich HHZ82	-32,73 ± 0,21	-29,77 ± 0,81	-31,25	✓
Bauteilbereich HHZ82	-33,30 ± 0,79	-31,27 ± 0,83	-32,29	✓

Bei duroplastischen Elastomeren auf EVA-Basis wird die Glasübergangstemperatur über die anteilige Mischung der beiden Polymere Polyethylen und Vinylacetat eingestellt. Die Glasübergangstemperatur von Polyethylen liegt bei ca. -80 °C [39] und die von Vinylacetat bei ca. 28 °C [89]. Wenn der Anteil des Vinylacetats im Copolymer bei ca. 80 % liegt, stellt sich eine Glasübergangstemperatur von ca. 0 °C ein [89]. Bei einer Mischung mit ca. 40 bis 50 % Vinylacetat und entsprechend 50 bis 60 % Polyethylen liegt die Glasübergangstemperatur im Copolymer bei ca. -33 bis -30 °C [89]. Durch den Hersteller Kraiburg GmbH & Co. KG wird eine Versuchstype (HHZ82) zur Verfügung gestellt, die die Anforderung an die Glasübergangstemperatur erfüllt. Sie liegt laut Datenblatt bei -33 °C.

In Abb. 5.12 sind beispielhaft, für jeweils einen Prüfkörper des Gelenk- und Bauteilbereichs mit HHZ82, die Kurven des Verlustmoduls  $G''$  und des Verlustfaktors  $\tan\delta$ , deren Maxima zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur herangezogen werden, dargestellt.



**Abb. 5.12 Exemplarisches Ergebnis von Verlustmodul  $G''$  und -faktor  $\tan\delta$  aus DMTA-Messung an den Gelenk- und Bauteilbereichen mit HHZ82 nach DIN EN ISO 6721-2:2019 [35].**

Es ist zu erkennen, dass für die Bestimmung der Glasübergangstemperatur über den Verlustfaktor  $\tan\delta$  das Maximum des Gelenkbereichs nicht in dem grau markierten Bereich liegt. Allerdings sind bei den anderen drei Kurven die Maxima bei ca.  $-30\text{ °C}$ , so dass hier davon ausgegangen werden kann, dass es sich um einen Nebeneffekt aufgrund der unterschiedlichen Materialien im Hybridverbund handelt, die tatsächliche Glasübergangstemperatur aber bei ca.  $-30\text{ °C}$  liegt. Die Anforderungen an die Glasübergangstemperatur von Außenfassadenbauteilen werden folglich mit einem Hybridverbund bestehend aus TPU, ET222 und HHZ82 erfüllt.

Die Versuchstype HHZ82 ist allerdings nicht kommerziell verfügbar und kann innerhalb dieser Arbeit nicht verwendet werden. Daher werden mögliche Unterschiede in den Biegeigenschaften der beiden Elastomertypen in einer 2-Punkt Biegeprüfung (vgl. Kapitel 4.3.1) betrachtet. Der Laminataufbau entspricht Abb. 5.5A, wobei zum einen lediglich eine Schicht ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  ( $m_A = 165\text{ g/m}^2$ ) und zum anderen zwei Schichten ( $m_A = 330\text{ g/m}^2$ ) eingebracht werden. Die Einspannung in der 2-Punkt Biegevorrichtung erfolgt analog zu Abb. 5.3A. Bei Biegebelastung liegt die Elastomerschicht folglich auf der Druckseite. Die Ergebnisse der 2-Punkt-Biegeprüfung sind in Tab. 5.3 dargestellt. Insbesondere im Hinblick auf die Werte der Biegesteifigkeit ist zu beachten, dass die Dicke von HHZ82  $0,75\text{ mm}$  und die Dicke von HHZ99  $0,5\text{ mm}$  beträgt. Die Elastomerschicht HHZ82 ist folglich 1,5 Mal so dick wie HHZ99. Die Versuchstype HHZ82 ist aufgrund der mengenbedingten Herstellung auf einer Versuchsanlage nicht dünner herstellbar.

**Tab. 5.3 Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung (Biegesteifigkeit  $EI$  und Biegespannung  $\sigma_b$  des Gelenkbereichs mit HHZ99/HHZ82;** Aufbau analog zu Abb. 5.5A mit einer Schicht ( $m_A = 165\text{ g/m}^2$ ) oder zwei Schichten ( $m_A = 330\text{ g/m}^2$ ) ET222, Einspannung analog zu Abb. 5.3A ( $n = 5$ ).

		Gelenkbereich HHZ99 Textiles Flächengewicht $165\text{ g/m}^2$	Gelenkbereich HHZ82 Textiles Flächengewicht $330\text{ g/m}^2$	Gelenkbereich HHZ99 Textiles Flächengewicht $330\text{ g/m}^2$	Gelenkbereich HHZ82 Textiles Flächengewicht $330\text{ g/m}^2$
$EI$	in $\text{Nmm}^2$	$156,84 \pm 6,16$	$237,08 \pm 9,89$	$361,10 \pm 15,60$	$362,77 \pm 22,84$
$\sigma_b$	in MPa	$7,06 \pm 0,55$	$8,78 \pm 0,58$	$13,95 \pm 0,42$	$13,37 \pm 0,56$

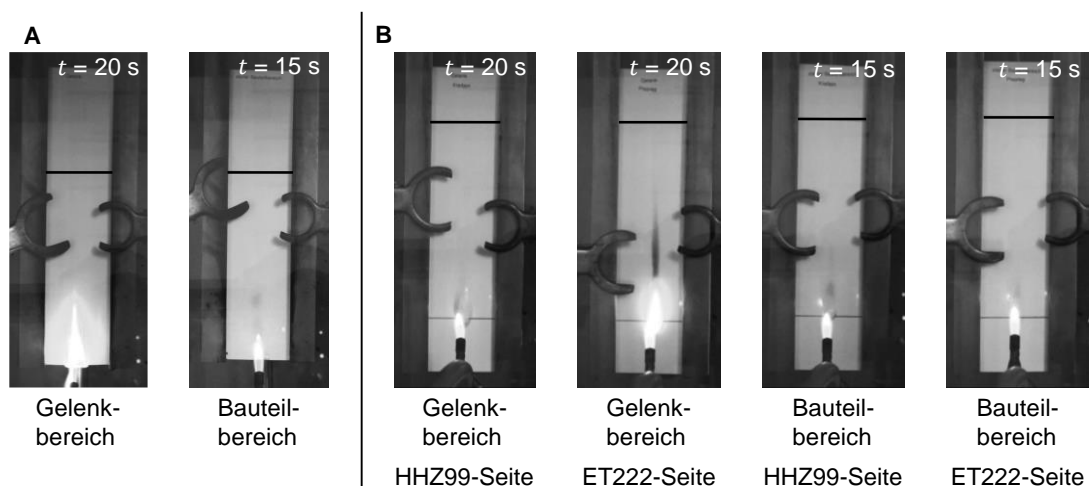
Es zeigt sich, dass sich die Biegeigenschaften der beiden Typen mit zunehmender Anzahl ET222-Schichten, wodurch der Einfluss des Dickenunterschiedes von HHZ99 und HHZ82 reduziert ist, lediglich minimal unterscheiden: Für einen Gelenkbereich analog zu Abb. 5.5A mit einer Schicht ET222  $(\pm 45)^\circ$  ( $m_A = 165\text{ g/m}^2$ ) resultieren für HHZ82 ca. 51 % höhere Biegesteifigkeiten als bei HHZ99. Mit zwei Schichten ET222  $(\pm 45)^\circ$  ( $m_A = 330\text{ g/m}^2$ ) sind die resultierenden Biegesteifigkeiten lediglich ca. 0,5 % höher. Im Hinblick auf die resultierenden Biegespannungen ist eine ähnliche Tendenz feststellbar: Mit einer Schicht ET222  $(\pm 45)^\circ$  ( $m_A = 165\text{ g/m}^2$ ) im Gelenkbereich sind diese ca. 20 %

höher und bei zwei Schichten ( $m_A = 330 \text{ g/m}^2$ ) lediglich ca. 4 % niedriger. Unter Berücksichtigung der Streuung ist zwischen den beiden Prüfkörpern mit zwei Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  im Gelenkbereich kein Unterschied feststellbar, trotz unterschiedlicher Dicken der Elastomerschichten.

Auf Basis dieser Ergebnisse hinsichtlich der Biegeeigenschaften kann für die Betrachtung der Auslegungskriterien von FVK-Gelenkbauteilen nach Materialansatz (III) die Elastomertypen HHZ99 verwendet werden, wenngleich in einem technisch umgesetzten Fassadenbauteil HHZ82 Anwendung finden müsste.

## 5.5 Brandverhalten nach Baustoffklasse B2

Im Fassadenbau muss das FVK-Gelenkbauteil mindestens die Anforderungen der Baustoffklasse B2 hinsichtlich der Brennbarkeit erfüllen. Die Prüfung nach DIN 4102-1:1998 [22] erfordert die Prüfung unter Flächen- und Kantenbeflammung für den gesamten Laminataufbau des eingesetzten FVK-Gelenkbauteils und ist nicht spezifisch für die Einzelschichten des Hybridverbunds. Innerhalb dieser Arbeit werden die in Abb. 5.5 schematisch dargestellten Laminataufbauten ( $h_{TPU} = 0,3 \text{ mm}$ ) exemplarisch für den Gelenk- und Bauteilbereich eines FVK-Gelenkbauteils verwendet. Der Übergangsbereich wird nicht untersucht, sondern lediglich die maximale und minimale Dicke des Laminataufbaus im Bauteil- und Gelenkbereich. In der Flächenbeflammung werden für beide Lamine zwei Prüfungen durchgeführt: Zum einen wird die HHZ99-Seite und zum anderen die ET222-Seite beflammt. In Abb. 5.13 sind Momentaufnahmen der Prüfung dargestellt.



**Abb. 5.13 Ergebnisse der Brandprüfung nach DIN 4102-1:1998 [22] ( $n = 5$ );**

Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs entsprechend Abb. 5.5; Zeitangabe entspricht bei Nicht-Entflammen dem Ende der Beflammungszeit ( $t = 15 \text{ s}$ ) und bei Entflammen dem Zeitpunkt zu dem für die Erfüllung der Baustoffklasse B2 die Messmarke nicht erreicht sein darf ( $t = 20 \text{ s}$ );

**A** Kantenbeflammung (Abstand Kante zu Messmarke  $s = 150 \text{ mm}$ ),

**B** Flächenbeflammung (Abstand Messmarke zu Messmarke  $s = 150 \text{ mm}$ ).

Dabei ist zu unterscheiden zwischen  $t = 15$  s (Ende Beflammungszeit), sofern der Prüfkörper nicht entflammte, und  $t = 20$  s (B2: kein Erreichen der Messmarke bis  $t = 20$  s), sofern der Prüfkörper entflammte oder aufgrund von Blasen an der Oberfläche unklar ist, ob ein Entflammen des Prüfkörpers stattfindet. Es ist festzuhalten, dass lediglich bei der Kantenbeflammung des Gelenkbereichs die Messmarke nach  $t = 40$  s erreicht wird. Somit gilt für die in Abb. 5.5 dargestellten Laminataufbauten und folglich auch für den Laminataufbau des Gelenkbauteils in Abb. 5.4 die B2 als erfüllt.

Für einen anderen Laminataufbau muss die Prüfung wiederholt werden. Allerdings handelt es sich bei dem geprüften Gelenkbereich, der als einziges entflammte, um den dünnsten Laminataufbau, der mit HHZ99, TPU und ET222 für ein FVK-Gelenkbauteil hergestellt werden kann. Die Prüfkörper des Bauteilbereichs sind nicht entflammt, so dass bereits jetzt vermutet werden kann, dass auch ein steiferer Aufbau des FVK-Gelenkbauteils bezüglich der Anforderungen an die Brennbarkeit unproblematisch ist.

### 5.6 Zusammenfassung Entwicklungsmethodik und ausgewählte Einzelschichten des Hybridverbunds

Ein Hybridverbund nach Materialansatz (III) (vgl. Abb. 2.3C) sieht die Kombination von FVK mit einem Elastomer oder Silikon vor. Der FVK wird hauptsächlich zur Versteifung der Bauteilbereiche und das Elastomer im Gelenkbereich eingesetzt. Eine genaue Spezifikation der Materialien oder der Herstellung eines Gelenkbauteils nach diesem Materialansatz liegt, nach dem in Kapitel 2.2 dargestellten Stand der Technik, nicht vor. [17, 77, 78, 92, 93, 108]

Eine Übersicht aller Einzelschritte der entwickelten Arbeitsmethodik zur Definition eines Materials für adaptive Fassadenbauteile ist in Abb. 5.14 dargestellt. Entsprechend der fünf Arbeitsschritte sind die Ergebnisse in Bezug auf die Hybridverbundentwicklung nach Materialansatz (III) aus den fünf vorangegangenen Kapiteln ergänzend zur grundlegenden Vorgehensweise dargestellt. Jeder Schritt hat eine Art Filterwirkung auf die Auswahl grundsätzlich geeigneter Materialien. Somit ergibt sich auf Basis der umfangreichen Analysen nur eine mögliche Materialkombination zur technischen Umsetzung eines Hybridverbunds nach Materialansatz (III) für adaptive Fassadenbauteile: HHZ82, ET222 und TPU ( $h = 0,3$  mm).

Die Auswahl des Prepregs ET222 ist nicht nur durch den wirtschaftlicheren Prozess der Laminatherstellung begründet, sondern auch durch die Möglichkeit aufgrund des durch den Herstellungsprozess bedingten höheren Fasergewichtsanteils flexiblere Lamine im Vergleich zu anderen geprüften Matrixsystemen herzustellen. Der Nachteil des auf Bisphenol-A basierenden Epoxidharzes ist die nicht vorhandene Witterungsbeständigkeit, hauptsächlich hinsichtlich der Farbänderung durch UV-Strahlung, aber auch bezüglich des



Festigkeitsverlustes durch den Abbau der Molekülketten unter UV-Strahlung. Dadurch wird die Kaschierung des Laminats mit TPU notwendig. Durch das Aufbringen der TPU-Schicht ist kein Festigkeitsverlust durch Bewitterung im Vergleich zu den unkaschierten Prüfkörpern feststellbar. Alle Materialien erfüllen zudem die Anforderung an die Verbundfestigkeit unter Mode I-Belastung. Die bisher nur als Versuchstypen angebotene Elastomertypen HHZ82 muss aufgrund der Verfügbarkeit innerhalb dieser Arbeit durch die Elastomertypen HHZ99 aus dem Standardsortiment des Elastomerherstellers Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG ersetzt werden. Die Elastomertypen HHZ99 erfüllt jedoch nicht die Anforderungen an die Glasübergangstemperatur für Außenfassadenbauteile. Aufgrund der ähnlichen Biegeeigenschaften beider Elastomertypen kann innerhalb dieser Arbeit zur Charakterisierung des Hybridverbunds trotzdem HHZ99 verwendet werden.

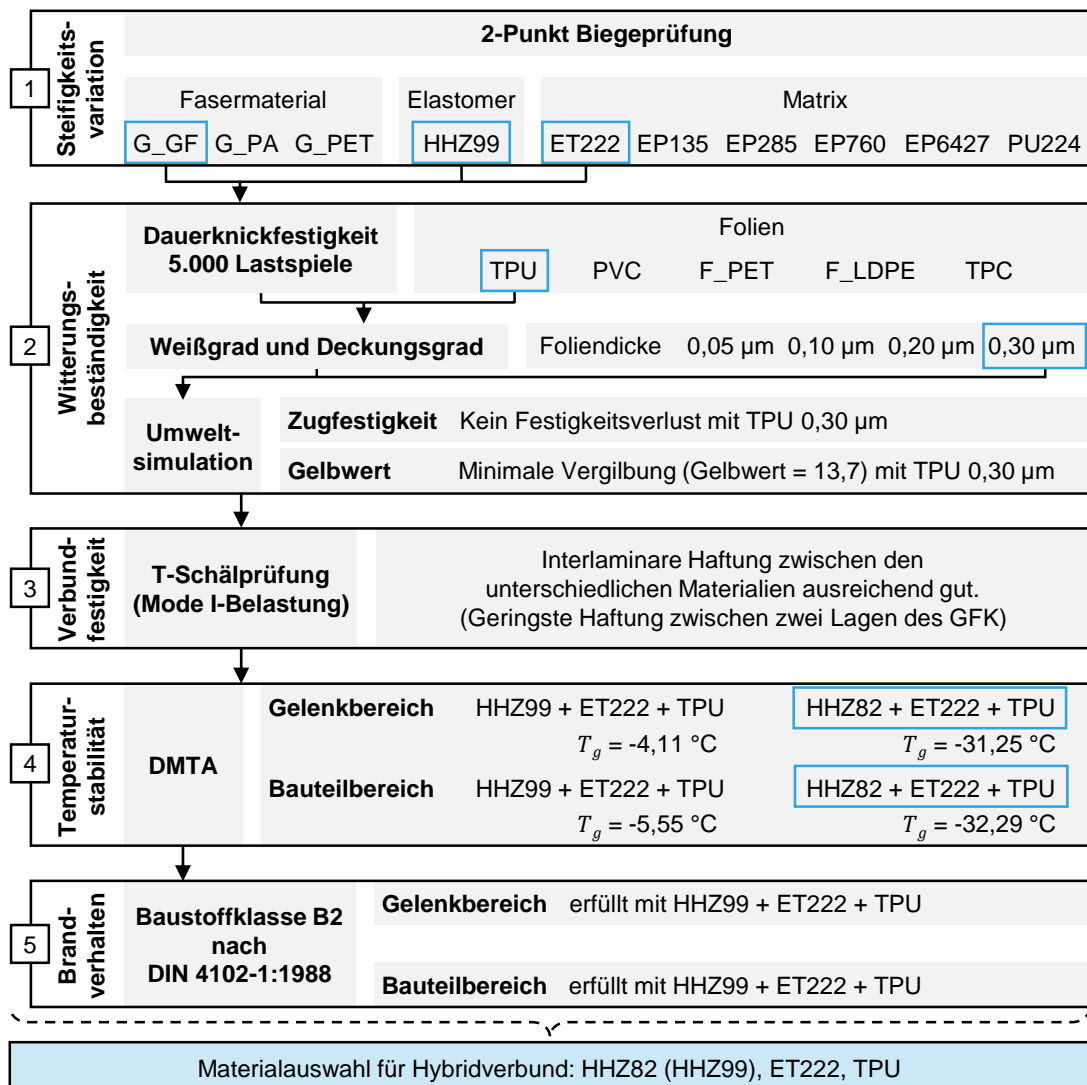
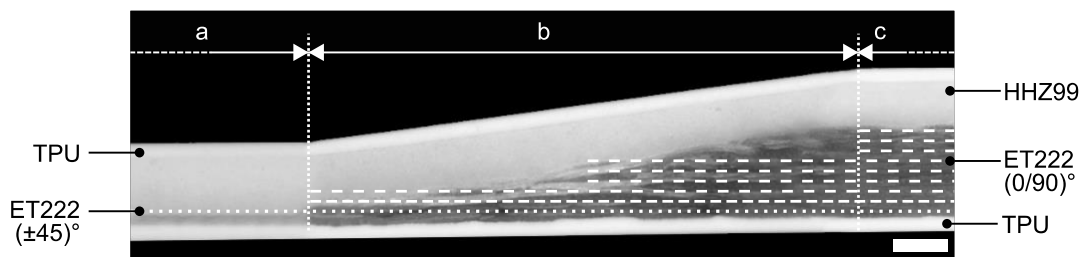


Abb. 5.14 Übersicht der in Kapitel 5 durchgeführten schrittweisen Materialanalyse hinsichtlich der Anforderungskriterien an ein adaptives Außenfassadenbauteil und Materialauswahl.

Für den Materialaufbau ist darüber hinaus zu beachten, dass, bedingt durch die notwendige Flexibilität im Gelenkbereich, eine Dünnstelle im FVK-Gelenkbauteil entsteht. Der Übergangsbereich zwischen dem Gelenkbereich und Bauteilbereich ist entsprechend nach Materialansatz (II) (vgl. Abb. 2.3B) gradiert auszuführen, um die Biegespannungen im Material zu reduzieren.

In Abb. 5.15 ist die Mikroskopieaufnahme einer Schliiffbildprobe mit den ausgewählten Materialien zu sehen. Die Kontur im Gelenk- und Übergangsbereich wurde hier durch einen gefrästen Metalleinleger im Pressprozess abgeformt. Die Einzelschichten der Gradiierung im Übergangsbereich sind dadurch nicht in der Mikroskopieaufnahme erkennbar, sie sind jedoch schematisch durch Linien gekennzeichnet.



**Abb. 5.15** Mikroskopieaufnahme einer Schliiffbildprobe eines Gelenkbauteils (Laminataufbau nach Abb. 5.4 mit den ausgewählten Materialien ET222, HHZ99 und TPU) mit (a) Gelenkbereich, (b) Übergangsbereich und (c) Bauteilbereich (Maßstab 1 mm) in Anlehnung an [13].

## 6. Analytische Berechnung der Lamineigenschaften des Hybridverbunds

Für die Auslegung eines adaptiven FVK-Gelenkbauteils, bestehend aus dem in Kapitel 5 festgelegten Hybridverbund, müssen die Zugfestigkeits- und Biegeeigenschaften überschlägig berechenbar sein. Die Zugfestigkeit des Gelenkbereichs muss so groß sein, dass dieser die Last der angrenzenden Bauteilbereiche auch unter zusätzlichen externen Lasten, bspw. Wind und Schnee, tragen kann. Durch die notwendige Zugfestigkeit wird der Laminataufbau des Gelenkbereichs determiniert. Die Biegesteifigkeit resultiert wiederum aus diesem Laminataufbau und muss für die Auslegung des Aktuierungsmechanismus bekannt sein. Die Zugfestigkeit und Biegesteifigkeit des Bauteilbereichs sind insofern relevant, als dass dieser sich nicht unter externer Last verformen darf. Eine rein experimentelle Bestimmung der Lamineigenschaften abhängig vom Laminataufbau ist, aufgrund der Vielzahl der möglichen Laminataufbauten, nicht möglich. Dieses Vorgehen wäre unwirtschaftlich und hätte keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Dementsprechend muss eine Methodik zur analytischen Berechnung dieser Eigenschaften für den festgelegten Hybridverbund definiert werden.

Die analytische Berechnung der Lamineigenschaften kann für stoffhomogene FVK mit der klassischen Laminattheorie (CLT) durchgeführt werden. Sie setzt ein symmetrisch aufgebautes Laminat mit Schichten gleicher Dicke voraus, dessen Gesamtdicke auch bei Verformung konstant bleibt [101]. Diese Kriterien sind allerdings nicht zutreffend in Bezug auf den in Kapitel 5 festgelegten Hybridverbund, der einen asymmetrischen Laminataufbau besitzt. Die Einzelschichten des Laminats aus den verschiedenen Materialien weisen zudem unterschiedliche Dicken auf, die sich – insbesondere die der nicht-faserverstärkten Schichten – unter Stauchung bzw. Dehnung verändern. Darüber hinaus ist das Verformungsverhalten der Einzelschichten, wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben, unterschiedlich (gummi-/energieelastisch). Durch die Kombination dieser Eigenschaften im Hybridverbund ist die CLT nicht anwendbar. Zum Beweis der Arbeitshypothese (2), dass die Lamineigenschaften abhängig von den Einzelschichten des Hybridverbunds einstellbar sind, muss folglich ein anderes Berechnungsverfahren verwendet werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird die entwickelte Rechenmethodik aufgezeigt, mit der die Zugfestigkeit und Biegesteifigkeit – die im Kontext der Auslegung eines FVK-Gelenkbauteils hauptsächlich relevanten Parameter – für den Hybridverbund berechnet werden können. Als Grundlage für die aufgezeigten Berechnungen wurden die Materialeigenschaften der Einzelschichten, verarbeitet unter den Prozessbedingungen wie sie in Kapitel 4.2.2 dargestellt sind, in Zug- und Schubprüfungen nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] bzw. DIN EN ISO 14129:1998 [23] (vgl. Kapitel 4.3.4) bestimmt. Die ermittelten effektiven Laminat-

eigenschaften aller Einzelschichten, die im Hybridverbund Anwendung finden, sind in Tab. 6.1 dargestellt.

**Tab. 6.1 Materialeigenschaften der Einzelschichten im Hybridverbund ( $n = 10$ );**

Laminatherstellung im Heißpressverfahren gemäß Kapitel 4.2.2 und geprüft nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] bzw. DIN EN ISO 14129:1998 [23].

	Faserorientierung in °	$E_{\parallel,\perp}$ in MPa	$G_{\parallel,\perp}$ in MPa	$\nu$ in -	$R_{\parallel,\perp}$ in MPa	$R_{\parallel,\perp}$ in MPa	$\rho$ in g/cm <sup>3</sup>	$h$ in mm
ET222	0/90	16.628,61	6.928,59	0,20	546,50	258,58	2,02	0,12
ET222	±45	6.928,59	16.628,61	1,20	258,58	546,50	2,02	0,12
HHZ99	-	15,98	6,15	0,30	1,89	1,89	1,74	0,49
TPU	-	126,43	46,83	0,35	7,16	7,16	1,10	0,25

## 6.1 Zugfestigkeit

Im Bereich der elastischen Verformung eines Körpers gilt das Hookesche Gesetz (vgl. Formel (6.1)), über das die Zugspannung bzw. die Zugfestigkeit berechnet wird.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.1)$$

Unter angelegter Zugspannung ist davon auszugehen, dass die Dehnung in allen Materialschichten gleich ist. Somit gilt:

$$\varepsilon_{TPU} = \varepsilon_{ET222 (0/90)^\circ} = \varepsilon_{ET222 (\pm 45)^\circ} = \varepsilon_{HHZ99} \quad (6.2)$$

Dadurch ergibt sich, dass das Verhältnis von Spannung  $\sigma$  und E-Modul  $E$  für alle Einzelschichten im Hybridverbund gleich ist:

$$\frac{\sigma_{TPU}}{E_{TPU}} = \frac{\sigma_{ET222 (0/90)^\circ}}{E_{ET222 (0/90)^\circ}} = \frac{\sigma_{ET222 (\pm 45)^\circ}}{E_{ET222 (\pm 45)^\circ}} = \frac{\sigma_{HHZ99}}{E_{HHZ99}} \quad (6.3)$$

Anhand der Formel (6.3) kann eine Aussage darüber getroffen werden, welche Materialschichten maßgeblich zur Zugfestigkeit des Hybridverbundes im Gelenk- und Bauteilbereich beitragen. Dazu werden die Einzelschichten und ihr Einfluss im Verhältnis zueinander betrachtet. Auf Basis dieser vereinfachten Abschätzung kann jedoch lediglich eine qualitativ vergleichende Aussage getroffen werden, da die tatsächliche Dicke der Materialien entsprechend der Anzahl der Einzelschichten im Hybridverbund keine Berücksichtigung findet.

Der Vergleich der beiden Einzelschichten HHZ99 und TPU, der in Formel (6.4) dargestellt ist, zeigt bereits, dass der Beitrag der TPU-Schicht zur Zugfestigkeit des Hybridverbunds

deutlich höher ist als der der HHZ99-Schicht. Ihr Beitrag ist fast achtfach höher bei gleichzeitig halber Dicke (vgl. Tab. 6.1).

$$\sigma_{TPU} = \sigma_{HHZ99} \cdot \frac{E_{TPU}}{E_{HHZ99}} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{TPU} = \sigma_{HHZ99} \cdot 7,94$$

Die Betrachtung der Zugspannung in der TPU-Schicht im Vergleich zu ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  zeigt allerdings, dass auch dieser Anteil an der Gesamtfestigkeit im Vergleich zum GFK sehr gering ist (vgl. Formel (6.5)). Die Zugspannung in der ET222  $(\pm 45)^\circ$ -Schicht ist im Vergleich zum TPU ca. fünfzig Mal so hoch. Somit kann an dieser Stelle bereits festgestellt werden, dass die Zugfestigkeit im Gelenkbereich, der lediglich ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$ , TPU und HHZ99 beinhaltet, hauptsächlich durch die ET222  $(\pm 45)^\circ$ -Schichten determiniert wird.

$$\sigma_{ET222(\pm 45)^\circ} = \sigma_{TPU} \cdot \frac{E_{ET222(\pm 45)^\circ}}{E_{TPU}} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{ET222(\pm 45)^\circ} = \sigma_{TPU} \cdot 54,80$$

Im Bauteilbereich werden darüber hinaus ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  eingebracht. Aufgrund der Faserorientierung tragen die Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  nur 0,42 Mal so viel zur Gesamtfestigkeit bei, wie die Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  (vgl. Formel (6.6)). Unabhängig von dem Verhältnis der GFK-Schichten zueinander, ist der Anteil beider GFK-Schichten im Vergleich zu TPU und HHZ99 als sehr hoch zu bewerten.

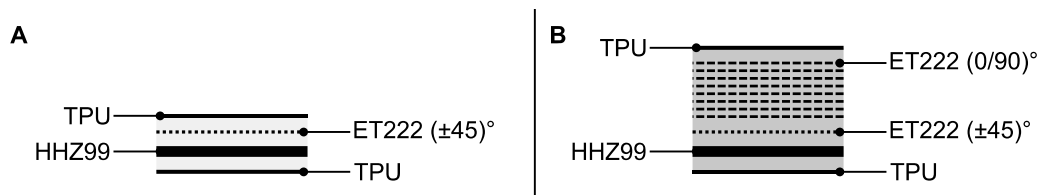
$$\sigma_{ET222(\pm 45)^\circ} = \sigma_{ET222(0/90)^\circ} \cdot \frac{E_{ET222(\pm 45)^\circ}}{E_{ET222(0/90)^\circ}} \quad (6.6)$$

$$\sigma_{ET222(\pm 45)^\circ} = \sigma_{ET222(0/90)^\circ} \cdot 0,42$$

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Zugfestigkeit hauptsächlich durch die GFK-Anteile im Gelenk- und Bauteilbereich beeinflusst wird. Sind also die exakten Dimensionen einer adaptiven, faltbaren Fassadenverschattung bekannt, so kann zunächst die Festigkeit vom Bauteilbereich eingestellt und anschließend der Gelenkbereich mit der GFK-Verstärkung so aufgebaut werden, dass die Tragfähigkeit ausreichend für die Gewichtslast der bewegten Bauteilflächen ist.

Die Zugfestigkeit wird mit der entwickelten Rechenmethodik exemplarisch für einen Laminataufbau eines FVK-Gelenkbauteils bzw. für die jeweils entsprechenden Laminat-

aufbauten des Gelenk- und Bauteilbereichs des FVK-Gelenkbauteils berechnet. Parallel zur analytischen Berechnung werden die Laminataufbauten experimentell geprüft und die experimentell ermittelten Ergebnisse den berechneten zur Validierung der Rechenmethodik gegenübergestellt. In Abb. 6.1 sind die verwendeten Laminataufbauten mit einer Schicht ET222 ( $\pm 45^\circ$ ) im Gelenk- und Bauteilbereich sowie acht versteifenden Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  im Bauteilbereich dargestellt. Der Aufbau basiert auf Versuchen, die außerhalb dieser Arbeit durchgeführt und in einem Demonstrator einer adaptiven Fassadenverschattung umgesetzt wurden [12, 13, 62, 91].



**Abb. 6.1 Schematischer Laminataufbau für die Berechnung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften; A Gelenkbereich, B Bauteilbereich.**

Da die Materialschichten mit zunehmender Steifigkeit anteilig eine höhere Spannung aufnehmen [101], wird ein Federsystem mit Parallelschaltung angenommen. Für die Federsteifigkeit  $D$  einer Materialschicht gilt mit der Querschnittsfläche  $A$  und der Länge  $l_0$ :

$$D = \frac{E \cdot A}{l_0} \quad (6.7)$$

Für die Federsteifigkeit gilt unter Last mit der Längenänderung  $\Delta l$  und der eingetragenen Kraft  $F$  ebenso:

$$D = \frac{F}{\Delta l} \quad (6.8)$$

Für den vorliegenden Zug-Lastfall ist die Längenänderung analog zur Dehnung (vgl. Formel (6.2)) in allen Schichten gleich. Es gilt:

$$\Delta l = \Delta l_{TPU} = \Delta l_{ET222 (0/90)^\circ} = \Delta l_{ET222 (\pm 45)^\circ} = \Delta l_{HHZ99} \quad (6.9)$$

Darüber hinaus gelten die Bedingungen (6.10) und (6.11) im Hinblick auf die wirkende Kraft im Gesamtverbund  $F_{ges}$  und die Federsteifigkeit des Gesamtverbundes  $D_{ges}$ .

$$F_{ges} = F_{TPU} + F_{ET222 (0/90)^\circ} + F_{ET222 (\pm 45)^\circ} + F_{HHZ99} \quad (6.10)$$

$$D_{ges} = D_{TPU} + D_{ET222 (0/90)^\circ} + D_{ET222 (\pm 45)^\circ} + D_{HHZ99} \quad (6.11)$$

Demzufolge kann angenommen werden, dass die Kräfte in den Einzelschichten  $F_k$  anteilig, entsprechend ihrer Steifigkeit, verteilt sind (vgl. Formel (6.12) und (6.13)).

$$\begin{aligned}
 F_k &= D_k \cdot l_k \\
 F_k &= D_k \cdot l_{ges} \\
 F_k &= D_k \cdot \frac{F_{ges}}{D_{ges}} = \frac{D_k}{D_{ges}} \cdot F_{ges} = \frac{D_k}{\sum_{k=1}^{k=N} D_k} \cdot F_{ges} \\
 F_k &= \frac{E_k \cdot A_k}{\sum_{k=1}^{k=N} E_k \cdot A_k} \cdot F_{ges}
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Da die Breite  $b$  aller Schichten gleich ist, kann sie in der Berechnung der anteiligen Kräfte in den Einzelschichten vernachlässigt werden:

$$\begin{aligned}
 F_k &= \frac{E_k \cdot b \cdot h_k}{b \cdot \sum_{k=1}^{k=N} E_k \cdot h_k} \cdot F_{ges} \\
 F_k &= \frac{E_k \cdot h_k}{\sum_{k=1}^{k=N} E_k \cdot h_k} \cdot F_{ges}
 \end{aligned} \tag{6.13}$$

Über den Bruchterm von Formel (6.13) wird der prozentuale Anteil der Kraftaufnahme  $F_P$  in den Materialschichten berechnet. Die prozentualen Anteile  $F_P$  für die Materialschichten im Gelenk- und Bauteilbereich mit einer Schicht ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  und acht Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  sind in Tab. 6.5 aufgeführt. Die berechneten Werte bestätigen den überschlägigen Vergleich der Spannungen in den Einzelschichten aus Formel (6.4) bis (6.6).

**Tab. 6.2** Prozentualer Anteil  $F_P$  der Lastaufnahme in den Materialschichten des Gelenk- und Bauteilbereichs; Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs analog zu Abb. 6.1.

Gelenkbereich			Bauteilbereich			
$F_{PG\_TPU}$ ( $n_k = 2$ ) in %	$F_{PG\_ET222 (\pm 45)^\circ}$ ( $n_k = 1$ ) in %	$F_{PG\_HHZ99}$ ( $n_k = 1$ ) in %	$F_{PB\_TPU}$ ( $n_k = 2$ ) in %	$F_{PB\_ET222 (\pm 45)^\circ}$ ( $n_k = 1$ ) in %	$F_{PB\_ET222 (0/90)^\circ}$ ( $n_k = 8$ ) in %	$F_{PB\_HHZ99}$ ( $n_k = 1$ ) in %
7,00	92,13	0,87	0,19	4,94	94,83	0,05

Die zulässige Kraft je Materialschicht berechnet sich über die Formel (6.14) mit den Zugfestigkeiten  $R_{\parallel, \perp}$  und der Dicke der Materialien  $h$  entsprechend Tab. 6.1. In der Berechnung der Querschnittsfläche wird die Dicke der Materialschichten durch Multiplikation der Dicke der Einzelschichten  $h_k$  mit der Anzahl der Schichten im Gelenk- bzw. Bauteilbereich ermittelt und die Breite eines Zugprüfkörpers nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] mit  $b = 25$  mm angenommen.

$$\sigma_z = \frac{F}{A} \quad (6.14)$$

Die maximale Kraftaufnahme  $F_{max}$  je Materialschicht im Hybridverbund ist in Tab. 6.3 aufgeführt.

**Tab. 6.3 Maximale Kraftaufnahme  $F_{max}$  je Materialschicht im Gelenk- und Bauteilbereich;** Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs analog zu Abb. 6.1.

Gelenkbereich			Bauteilbereich			
$F_{maxG\_TPU}$ ( $n_k = 2$ ) in N	$F_{maxG\_ET222 (\pm 45)^\circ}$ ( $n_k = 1$ ) in N	$F_{maxG\_HHZ99}$ ( $n_k = 1$ ) in N	$F_{maxB\_TPU}$ ( $n_k = 2$ ) in N	$F_{maxB\_ET222 (\pm 45)^\circ}$ ( $n_k = 1$ ) in N	$F_{maxB\_ET222 (0/90)^\circ}$ ( $n_k = 8$ ) in N	$F_{maxB\_HHZ99}$ ( $n_k = 1$ ) in N
89,50	775,74	23,15	89,50	775,74	13.116,00	23,15

Basierend auf der für die Materialschichten des Gelenk- und Bauteilbereichs bekannten prozentuale Lastaufnahme  $F_P$ , kann die maximal zulässige Kraft  $F_{zul}$  in diesen Materialschichten entsprechend Formel (6.15) bestimmt werden.

$$F_{zul} = \frac{F_{max}}{F_P} \quad (6.15)$$

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tab. 6.4 dargestellt.

**Tab. 6.4 Maximal zulässige Kraft  $F_{zul}$  in den Materialschichten des Gelenk- und Bauteilbereichs;** Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs analog zu Abb. 6.1.

Gelenkbereich			Bauteilbereich			
$F_{zulG\_TPU}$ ( $n_k = 2$ ) in N	$F_{zulG\_ET222 (\pm 45)^\circ}$ ( $n_k = 1$ ) in N	$F_{zulG\_HHZ99}$ ( $n_k = 1$ ) in N	$F_{zulB\_TPU}$ ( $n_k = 2$ ) in N	$F_{zulB\_ET222 (\pm 45)^\circ}$ ( $n_k = 1$ ) in N	$F_{zulB\_ET222 (0/90)^\circ}$ ( $n_k = 8$ ) in N	$F_{zulB\_HHZ99}$ ( $n_k = 1$ ) in N
1.277,73	842,03	2.668,45	23.878,85	15.736,23	13.857,50	49.869,57

Es ist nachzuvollziehen, dass im Gelenkbereich die maximal zulässige Kraft  $F_{zul}$  in der  $(\pm 45)^\circ$  orientierten Schicht ET222 am geringsten ist. Ursächlich ist die unterschiedliche Spannungsverteilung in den Materialschichten bedingt durch die verschiedenen Steifigkeiten der Materialien. Im Bauteilbereich ist  $F_{zul}$  dagegen in den  $(0/90)^\circ$  orientierten Schichten ET222 am geringsten. Durch das Einsetzen von  $F_{zul}$  in die Formel (6.14) mit der Querschnittsfläche des Gelenk- bzw. Bauteilbereichs ergibt sich die Zugfestigkeit  $\sigma_z$  der zwei Bereiche. Die Zugfestigkeiten beider Laminataufbauten wurden ebenfalls experimentell ermittelt. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung sind in Tab. 6.5 den Ergebnissen der Berechnung gegenübergestellt. Die Analyse der Abweichungen in Tab. 6.5 unter Berücksichtigung der Streuung der experimentell ermittelten Werte zeigt, dass sich über diesen Rechenweg die Zugfestigkeit gut abschätzen lässt. Dies gilt insbesondere für die Festigkeit

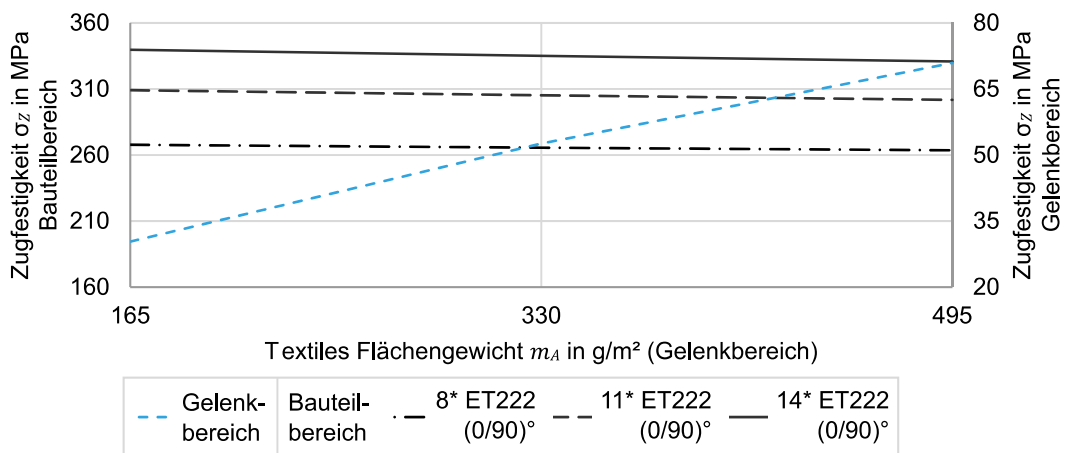


des Gelenkbereichs: Hier liegen die berechneten Werte innerhalb des Streubereichs der mechanischen Prüfung.

**Tab. 6.5** Gegenüberstellung rechnerisch und experimentell ermittelter Werte der Zugfestigkeit  $\sigma_z$  ( $n = 5$ ); Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs analog zu Abb. 6.1.

	$\sigma_z$ (experimentell) in MPa	$\sigma_z$ (rechnerisch) in MPa	Abweichung Mittelwert in %
Gelenkbereich ( $h \approx 1,06$ )	32,51±3,13	30,34	-6,66
Bauteilbereich ( $h \approx 1,96$ )	302,76±9,28	267,78	-11,55

Die Prognose der Zugfestigkeit  $\sigma_z$  vom Gelenk- und Bauteilbereich ist folglich auf Basis des dargestellten Rechenweges möglich. Abb. 6.2 zeigt exemplarisch die prognostizierten Festigkeitswerte für verschiedene Laminataufbauten eines Gelenkbauteils in Abhängigkeit vom textilen Flächengewicht im Gelenkbereich.



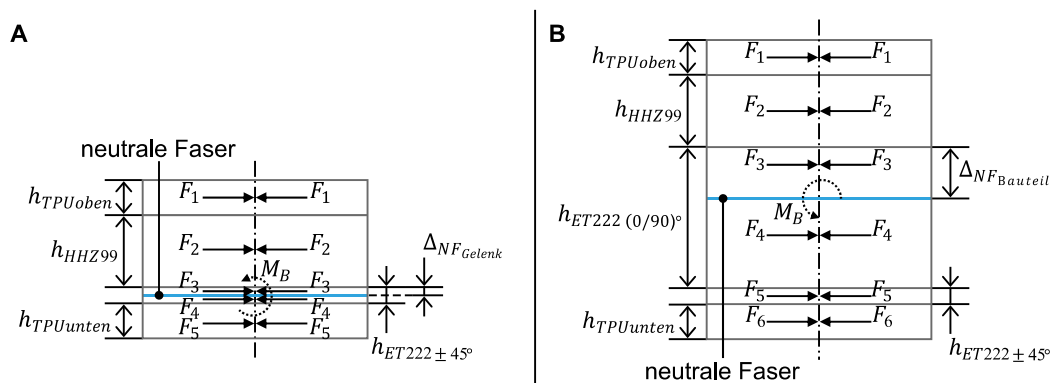
**Abb. 6.2** Zugfestigkeiten  $\sigma_z$  für den Gelenk- und Bauteilbereich (rechnerisch ermittelt) abhängig vom textilen Flächengewicht  $m_A$  im Gelenkbereich mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$ ; Laminataufbau analog zu Abb. 6.1 mit ein/zwei/drei Schichten ET222  $(\pm 45)^\circ$  im Gelenkbereich bzw. acht/elf/vierzehn Schichten ET222  $(0/90)^\circ$  im Bauteilbereich.

Im Gelenkbereich sind ein, zwei oder drei Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  (textiles Flächengewicht  $m_A = 165 \text{ g/m}^2$ ,  $330 \text{ g/m}^2$  oder  $495 \text{ g/m}^2$ ) eingebracht. Der Bauteilbereich berücksichtigt diese Änderung in der Schichtanzahl, da die  $(\pm 45)^\circ$ -Schichten über das gesamte Gelenkbauteil eingebracht werden. Darüber hinaus variiert die Anzahl der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  im Bauteilbereich von acht über elf bis zu vierzehn Schichten. Die maximal aufbringbare Last wird aufgrund der zusätzlichen Schichten ET222  $(\pm 45)^\circ$  im Bauteilbereich größer, jedoch wird die querschnittsbezogene Festigkeit, die in Abb. 6.2 dargestellt ist, geringer. Im Gelenkbereich ist dagegen eine Zunahme von Lastaufnahme und Festigkeit festzustellen.

## 6.2 Biegesteifigkeit

Für die Auslegung des FVK-Gelenkbauteils hat die Biegesteifigkeit  $EI$  neben der Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  die größte Relevanz. Auf Basis der Biegesteifigkeit des Gelenkbauteils erfolgt die Auslegung der Aktuatoren im Anwendungsfall. Üblicherweise kann die Biegesteifigkeit über das Produkt aus E-Modul  $E$  und Flächenträgheitsmoment  $I$  berechnet werden. Im Hybridverbund müssen die Einzelschichten allerdings aufgrund ihrer unterschiedlichen E-Moduln (vgl. Tab. 6.1) in der Berechnung der Biegesteifigkeit abhängig von ihrer Dicke gewichtet werden und dürfen nicht zu gleichen Anteilen auf ein Flächenträgheitsmoment des Gesamtquerschnitts bezogen werden.

Darüber hinaus wird die Biegesteifigkeit von der Lage der Einzelschichten in Relation zur neutralen Faser des Laminats beeinflusst. Im Hybridverbund liegt die neutrale Faser nicht wie bei klassischen FVK-Laminaten in der geometrischen Mitte des Laminats, sondern ist infolge der Asymmetrie und der unterschiedlichen Steifigkeiten der Einzelschichten parallel zur Querschnittsmitte verschoben (vgl. Abb. 6.3). Dementsprechend muss für die Berechnung der Biegesteifigkeit  $EI$  zunächst die Verschiebung der neutralen Faser  $\Delta_{NF}$  (vgl. Abb. 6.3) für den Gelenk- und Bauteilbereich berechnet werden. Dazu wird das Kräftegleichgewicht unter Biegemoment-Belastung vorausgesetzt.



**Abb. 6.3** Resultierende Kräfte durch Anlegen eines Biegemoments  $M_B$  an die parallel zur Querschnittsmitte verschobene neutrale Faser;  
A Gelenkbereich, B Bauteilbereich

Die Berechnung der Biegesteifigkeit  $EI$  wird exemplarisch für den Gelenk- und Bauteilbereich analog zu Abb. 6.1 durchgeführt. Somit gilt für den Gelenkbereich:

$$\begin{aligned}
 & F_1 \cdot \left( \Delta_{NF_{Gelenk}} + h_{HHZ99} + \frac{h_{TPUoben}}{2} \right) + F_2 \cdot \left( \Delta_{NF_{Gelenk}} + \frac{h_{HHZ99}}{2} \right) + F_3 \\
 & \cdot \frac{\Delta_{NF_{Gelenk}}}{2} = F_4 \cdot \frac{h_{ET222(\pm 45)^\circ} - \Delta_{NF_{Gelenk}}}{2} + F_5 \\
 & \cdot \left( h_{ET222(\pm 45)^\circ} - \Delta_{NF_{Gelenk}} + \frac{h_{TPUunten}}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{6.16}$$

Dabei gilt für die Kräfte  $F_1$  bis  $F_5$ :

$$F_1 = E_{TPU} \cdot h_{TPUoben} \quad (6.17)$$

$$F_2 = E_{HHZ99} \cdot h_{HHZ99} \quad (6.18)$$

$$F_3 = E_{ET222 (\pm 45)^\circ} \cdot \Delta_{NF_{Gelenk}} \quad (6.19)$$

$$F_4 = E_{ET222 (\pm 45)^\circ} \cdot (h_{ET222 (\pm 45)^\circ} - \Delta_{NF_{Gelenk}}) \quad (6.20)$$

$$F_5 = E_{TPU} \cdot h_{TPUunten} \quad (6.21)$$

Für den Bauteilbereich gilt demnach gleichermaßen:

$$\begin{aligned} F_1 \cdot \left( \Delta_{NF_{Bauteil}} + h_{HHZ99} + \frac{h_{TPUoben}}{2} \right) + F_2 \cdot \left( \Delta_{NF_{Bauteil}} + \frac{h_{HHZ99}}{2} \right) + F_3 \\ \cdot \frac{\Delta_{NF_{Bauteil}}}{2} = F_4 \cdot \frac{h_{ET222 (0/90)^\circ} - \Delta_{NF_{Bauteil}}}{2} + F_5 \\ \cdot \left( h_{ET222 (0/90)^\circ} - \Delta_{NF_{Bauteil}} + \frac{h_{ET222 (\pm 45)^\circ}}{2} \right) + F_6 \\ \cdot \left( h_{ET222 (0/90)^\circ} - \Delta_{NF_{Bauteil}} + h_{ET222 (\pm 45)^\circ} + \frac{h_{TPU}}{2} \right) \end{aligned} \quad (6.22)$$

Dabei gilt für die Kräfte  $F_1$  bis  $F_6$ :

$$F_1 = E_{TPU} \cdot h_{TPUoben} \quad (6.23)$$

$$F_2 = E_{HHZ99} \cdot h_{HHZ99} \quad (6.24)$$

$$F_3 = E_{ET222 (0/90)^\circ} \cdot \Delta_{NF_{Bauteil}} \quad (6.25)$$

$$F_4 = E_{ET222 (0/90)^\circ} \cdot (h_{ET222 (0/90)^\circ} - \Delta_{NF_{Bauteil}}) \quad (6.26)$$

$$F_5 = E_{ET222 (\pm 45)^\circ} \cdot h_{ET222 (\pm 45)^\circ} \quad (6.27)$$

$$F_6 = E_{TPU} \cdot h_{TPUunten} \quad (6.28)$$

Auf Basis der in den Formeln (6.16) bis (6.28) dargestellten Berechnungen für den Gelenk- und Bauteilbereich ergibt sich eine Verschiebung der neutralen Faser im Gelenkbereich von  $\Delta_{NF_{Gelenk}} = 0,064$  mm und im Bauteilbereich von  $\Delta_{NF_{Bauteil}} = 0,508$  mm. Unter Berücksichtigung der Verschiebung der neutralen Faser kann nach dem Satz von Steiner das Flächenträgheitsmoment  $I_k$  je Einzelschicht  $k$  nach der Formel (6.29) mit den Steinerschen

Anteilen  $y_k$  berechnet werden. Das Flächenträgheitsmoment  $I_k$  wird aus dem Trägheitsmoment der Einzelschicht bei rechteckigem Querschnitt und dem Steinerschen Anteil, multipliziert mit der Querschnittsfläche  $A_k$ , berechnet (vgl. Formel (6.29)).

$$I_k = \frac{b \cdot h_k^3}{12} + y_k^2 \cdot A_k \quad (6.29)$$

Die E-Moduln der Einzelschichten  $E_k$  werden durch die berechneten Flächenträgheitsmomente  $I_k$  gewichtet und ergeben in der Summe die Biegesteifigkeit  $EI$  (vgl. Formel (6.30)).

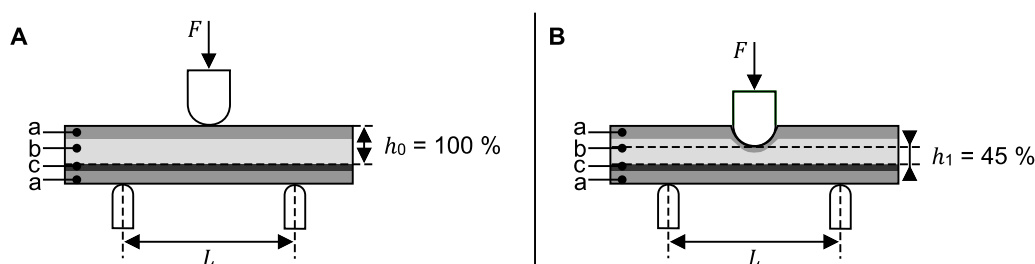
$$EI = \sum_{k=1}^{k=N} E_k \cdot I_k \quad (6.30)$$

Die Biegesteifigkeit  $EI$  der Laminataufbauten vom Gelenk- und Bauteilbereich wird zudem experimentell in der 3-Punkt-Biegeprüfung, analog zu Kapitel 4.3.2, ermittelt. Dabei liegt die HHZ99-Seite der Laminataufbauten oben (Druckseite) und die ET222-Seite unten (Zugseite). Die nach der Formel (4.6) berechneten Werte für die Biegesteifigkeit  $EI$  der zwei Laminataufbauten sind den Ergebnissen der experimentellen Prüfung in Tab. 6.6 gegenübergestellt.

**Tab. 6.6** Gegenüberstellung rechnerisch und experimentell (3-Punkt-Biegeprüfung) ermittelter Werte der Biegesteifigkeit  $EI$  ( $n = 5$ );  
Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs entsprechend Abb. 6.1.

	$EI$ (experimentell) in Nmm <sup>2</sup>	$EI$ (rechnerisch) in Nmm <sup>2</sup>	Abweichung Mittelwert in %
Gelenkbereich ( $h \approx 1,06$ )	60,63±6,60	260,11	+329,01
Bauteilbereich ( $h \approx 1,96$ )	20.407,21±387,08	22.762,59	+11,54

Die Abweichung der rechnerisch ermittelten Werte ist insbesondere für den Gelenkbereich sehr hoch. Es ist anzunehmen, dass diese Abweichung auf eine Komprimierung der oberen beiden Schichten, bestehend aus TPU und HHZ99, in der experimentellen Ermittlung der Biegesteifigkeit  $EI$  mittels 3-Punkt-Biegeprüfung zurückzuführen ist (vgl. Abb. 6.4).

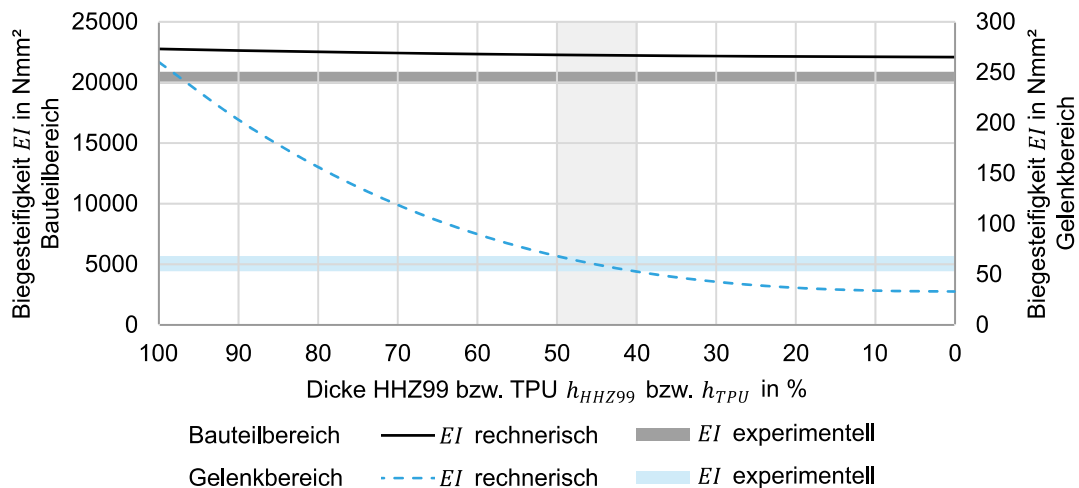


**Abb. 6.4** Dickenänderung der oben liegenden TPU- und HHZ99-Schicht des Prüfkörpers in der 3-Punkt-Biegeprüfung mit (a) TPU, (b) HHZ99, (c) ET222; **A** Ursprüngliche Dicke  $h_0$  des Prüfkörpers, **B** Dickenkomprimierung auf  $h_1 = 45\%$  der ursprünglichen Dicke.

Sie liegen in der Prüfung auf der Oberseite, so dass sie durch die Druckfinne und den punktuellen Lasteintrag komprimiert werden könnten. Durch die Dickenveränderung würde sich einerseits die neutrale Faser verschieben und sich andererseits das Flächenträgheitsmoment durch eine geringere Dicke des Laminats insgesamt reduzieren.

Es ist möglich, dass, sofern dieser Effekt auftritt, auch der E-Modul der Einzelschichten  $E_k$  verändert wird. Da die Dicke der Einzelschichten  $h_k$  in der Berechnung des Flächenträgheitsmoments (vgl. Formel (6.29)) sowohl im Trägheitsmoment bei rechteckigem Querschnitt als auch im Steinerschen Anteil und der Querschnittsfläche einfließt, der E-Modul dagegen jedoch nur einfach, kann eine Veränderung des E-Moduls in der Betrachtung dieser Hypothese vernachlässigt werden.

In Abb. 6.5 sind die rechnerisch ermittelten Werte für die Biegesteifigkeit  $EI$  im Gelenk- und Bauteilbereich gezeigt.



**Abb. 6.5** Gegenüberstellung rechnerisch und experimentell (3-Punkt-Biegeprüfung) ermittelter Werte der Biegesteifigkeit  $EI$  ( $n = 5$ );

Prozentuale Dickenänderung der oberen TPU- und der HHZ99-Schicht für die berechneten Werte, experimentelle Werte zeigen Mittelwert und Streubereich (Standardabweichung) ohne Dickenänderung, Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs entsprechend Abb. 6.1, Überlappung experimentell und rechnerisch ermittelter Werte der Biegesteifigkeit des Gelenkbereichs senkrecht grau hinterlegt.

Darüber hinaus ist horizontal der Bereich farblich hervorgehoben, der den experimentell ermittelten Werten der Biegesteifigkeit  $EI$  für den Gelenk- und Bauteilbereich bzw. dem Mittelwert mit Standardabweichung entspricht. Es ist erkennbar, dass es auch bei Annahme einer Dickenkomprimierung im Fall des Bauteilbereichs keine Überschneidung von experimentell und rechnerisch ermittelten Werten gibt. Hingegen kann für den Gelenkbereich eine Überschneidung bei einer Komprimierung der Dicke der HHZ99- und TPU-Schicht auf 40 bis 50 % festgestellt werden. Dieser Bereich ist in Abb. 6.5 senkrecht grau hinterlegt.

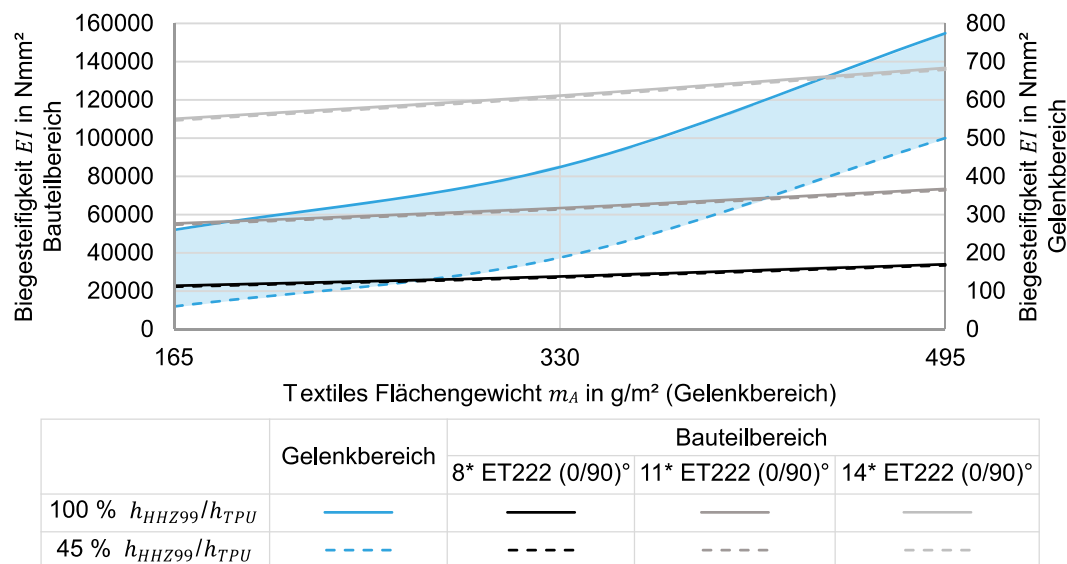
Die rechnerisch ermittelten Biegesteifigkeiten  $EI$  für den Mittelwert dieses Überschneidungsbereiches (45 %) sind in Tab. 6.7 den experimentell ermittelten Biegesteifigkeiten  $EI$  aus der 3-Punkt-Biegeprüfung gegenübergestellt.

**Tab. 6.7 Gegenüberstellung rechnerisch und experimentell (3-Punkt-Biegeprüfung) ermittelter Werte der Biegesteifigkeit  $EI$  unter Berücksichtigung einer Komprimierung der HHZ99- und TPU-Schicht auf 45 % der ursprünglichen Dicke ( $n = 5$ );**  
Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs entsprechend Abb. 6.1.

	$EI$ (experimentell) in Nmm <sup>2</sup>	$EI$ (rechnerisch) in Nmm <sup>2</sup>	Abweichung Mittelwert in %
Gelenkbereich ( $h \approx 1,06$ )	60,63±6,60	59,82	-1,34
Bauteilbereich ( $h \approx 1,96$ )	20.407,21±387,08	22.246,61	+9,01

Die Abweichungen von rechnerisch und experimentell ermittelten Werten liegen für den Bauteilbereich unter 10 %. Für den Gelenkbereich kann man aufgrund der Abweichung, die innerhalb des Streubereichs der experimentell ermittelten Werte liegt, von einer exakten Übereinstimmung der rechnerisch und experimentell bestimmten Biegesteifigkeit  $EI$  ausgehen.

In Abb. 6.6 sind die Biegesteifigkeiten  $EI$ , die sich durch den vorgestellten Rechenweg für den Gelenk- und Bauteilbereich ergeben, abhängig vom textilen Flächengewicht  $m_A$  im Gelenkbereich, dargestellt.



**Abb. 6.6 Biegesteifigkeiten  $EI$  für den Gelenk- und Bauteilbereich (rechnerisch ermittelt) mit/ohne Dickenkomprimierung der oberen TPU- und der HHZ99-Schicht abhängig vom textilen Flächengewicht  $m_A$  im Gelenkbereich mit einer Faserorientierung von ( $\pm 45$ )°; Laminataufbau analog zu Abb. 6.1 mit ein/zwei/drei Schichten ET222 ( $\pm 45$ )° im Gelenkbereich bzw. acht/elf/vierzehn Schichten ET222 (0/90)° im Bauteilbereich.**

Sowohl die theoretischen Biegesteifigkeiten ohne Dickenkomprimierung der HHZ99- und TPU-Schicht als auch die Biegesteifigkeiten mit Komprimierung dieser beiden Schichten auf 45 % von der ursprünglichen Dicke sind angegeben. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen Steifigkeiten in dem Bereich dazwischen liegen. Angesichts der großen Differenz zwischen der Biegesteifigkeit  $EI$  bei 100 % und bei 45 % Dicke der oberen TPU- und HHZ99-Schicht im Gelenkbereich ist der dazwischen liegende Bereich im Diagramm farblich hervorgehoben.

## Zusammenfassung der entwickelten analytischen Berechnungsmethodik

In Kapitel 6 wird die entwickelte Methodik zur Berechnung der Lamineigenschaften des Hybridverbunds gezeigt. Im Gegensatz zur analytischen Berechnung der Festigkeits- und Biegeeigenschaften von stoffhomogenen FVK ist für den Hybridverbund die CLT nicht anwendbar. Die vorgestellte Rechenmethodik, deren Einzelschritte in Abb. 6.7 dargestellt sind, erlaubt stattdessen die Berechnung der Zugfestigkeit  $\sigma_z$  unter Annahme einer Parallelschaltung der Einzelschichten in einem Federsystem und die Bestimmung der Biegesteifigkeit  $EI$  unter Annahme eines Kräftegleichgewichtes bei Belastung des Hybridlaminats durch ein Biegemoment.

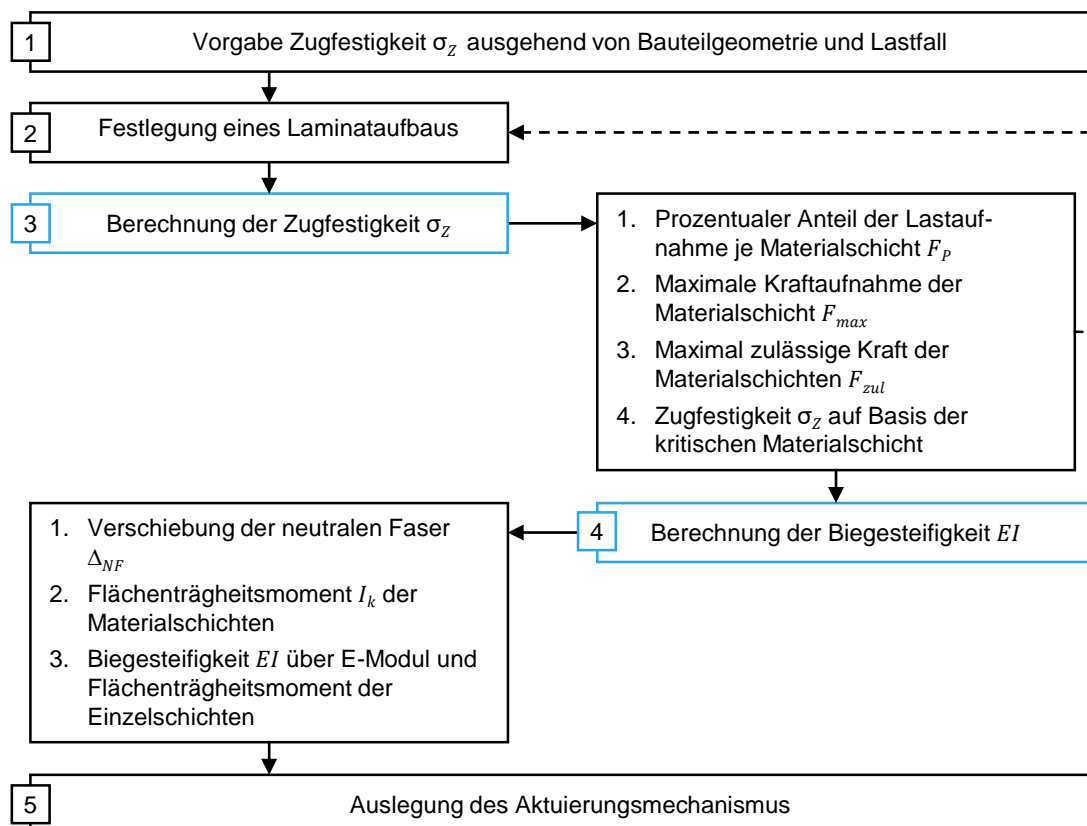


Abb. 6.7 Methodik zur analytischen Berechnung der Lamineigenschaften des Hybridverbunds.

Abhängig von Bauteilgeometrie und Lastfall des adaptiven Fassadenbauteils wird eine Zugfestigkeit für den Bauteil- und Gelenkbereich vorgegeben. Auf Basis von Erfahrungswerten wird ein Laminataufbau als Ausgangspunkt der Berechnung angenommen und die Festigkeitseigenschaften für diesen berechnet. Sofern die Festigkeit des angenommenen Laminataufbaus die erforderliche Festigkeit unterschreitet, wird dieser angepasst und die Festigkeit erneut berechnet. Diese Berechnungsschleife zur Bestimmung des Laminataufbaus, die innerhalb des Diagramms durch einen gestrichelten Pfeil gekennzeichnet ist, kann automatisiert mit einem Programm durchgeführt werden. Für den Laminataufbau, dessen Festigkeitseigenschaften der Vorgabe entsprechen, wird die Biegesteifigkeit  $EI$  bestimmt. Sie ist notwendig, um den Aktuierungsmechanismus für das adaptive Fassadenbauteil auszulegen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es die in Kapitel 6 dargestellte Rechenmethodik erlaubt, unter Berücksichtigung der Einflüsse durch das Prüfverfahren, die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Gelenk- und Bauteilbereichs im Hybridverbund zu charakterisieren. Es wurde gezeigt, dass die Festigkeitseigenschaften im Gelenk- und Bauteilbereich gezielt eingestellt werden können. Darüber hinaus konnte die Arbeitshypothese (2), nach der die Steifigkeitseigenschaften durch den Laminataufbau im Gelenk- und Bauteilbereich gezielt einstellbar sind, belegt werden.



## 7. Prüfmethodik für zyklische Biegeprüfung

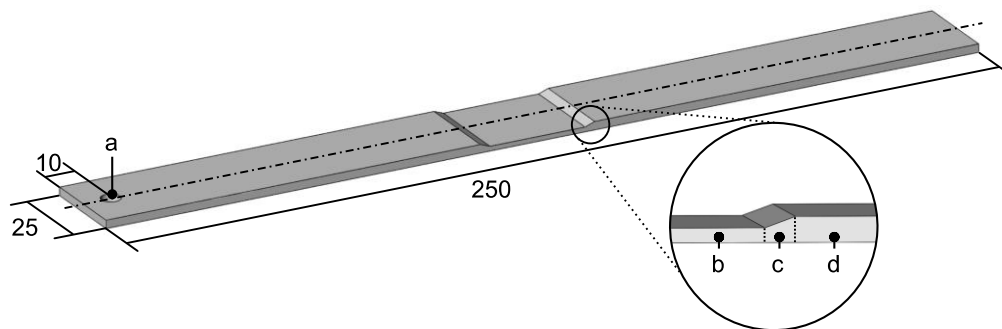
Nachdem der in Kapitel 5 beschriebene Materialaufbau aus TPU, ET222 und HHZ99 (vgl. Abb. 5.15) festgelegt wurde, und die mechanischen Eigenschaften des Gelenk- und Bauteilbereichs separat voneinander berechenbar sind (vgl. Kapitel 6), gilt es, die Auslegungskriterien von FVK-Gelenkbauteilen zu quantifizieren. Die Lamineigenschaften könnten gezielt eingestellt werden, damit das Gelenkbauteil die geplante Lebensdauer mit vorgegebenen Festigkeitseigenschaften erreicht (vgl. Arbeitshypothese (4)). Für die Untersuchung der Biegeeigenschaften steht für diesen Zweck nach aktuellem Stand der Technik jedoch keine Prüfmethodik zur Verfügung. Bekannte, genormte Prüfverfahren für FVK, bspw. die 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeprüfung nach DIN EN ISO 14125:2011 [27], sehen die zerstörende Prüfung von FVK unter kleinen Verformungswinkeln vor. Für die geplante Anwendung als adaptives, faltbares Bauteil sind jedoch die Biegeeigenschaften bis zu einem Verformungswinkel von  $180^\circ$  relevant. In Hanke et al. (2011) wird ein Prüfstand der Technischen Universität Dresden vorgestellt, der größere Deformationswinkel erlaubt [45]. Allerdings kann, aufgrund der geometrischen Abmaße des Prüfstands bzw. der Einspannung des Prüfkörpers auch hier kein Biegewinkel von  $180^\circ$  erreicht werden. Daher gilt es zunächst, entsprechend Arbeitshypothese (3), eine Prüfmethodik zu entwickeln, mit der sowohl die Biegeeigenschaften als auch die Effekte der zyklischen Beanspruchung auf die Zugfestigkeitseigenschaften eines FVK-Gelenkbauteils ermittelt werden können. Die Anforderungen (1) bis (9) an die Prüfmethodik im Allgemeinen bzw. den Prüfstand und die Auswertungsmethodik im Speziellen sind nachstehend aufgeführt.

- (1) Biegung des FVK-Gelenkbauteil-Prüfkörpers um effektiv  $180^\circ$
- (2) Krafteintrag in jeder Biegewinkelstellung senkrecht zum Gelenkbauteil
- (3) Reibungsfreie Kraftmessung
- (4) Prüfung von mind. 5.000 Lastspielen
- (5) Festigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] im Anschluss an die zyklische Belastung des Gelenkbauteils zur Bestimmung der Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$
- (6) Bestimmung der initialen Biegeeigenschaften: Biegesteifigkeit  $EI_0$  und max. Biegespannung  $\sigma_{b0}$
- (7) Bestimmung des Lastspiels, bei dem die Betriebsfestigkeit des FVK-Gelenkbauteils erreicht ist  $N_D$
- (8) Bestimmung der Biegeeigenschaften im Dauerbetrieb: Biegesteifigkeit  $EI_D$  und max. Biegespannung  $\sigma_{bD}$
- (9) Bestimmung des Versagenslastspiels des FVK-Gelenkbauteils  $N_B$

Innerhalb von Kapitel 7 wird der unter Berücksichtigung dieses Anforderungsprofils entwickelte Prüfstand dargestellt und erläutert sowie die entwickelte Methodik zur Prüfung von Gelenkbauteilen und die Auswertung der generierten Daten vorgestellt.

## 7.1 Entwicklung, Konstruktion und Bau eines zyklischen Biegeprüfstands

Die Anforderung (5), dass die Restzugfestigkeit des zyklisch belasteten FVK-Gelenkbauteils nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] bestimmbar sein muss, determiniert die Außenmaße des Prüfkörpers. Entsprechend dem in der Norm aufgezeigten Prüfkörpertyp 2, werden sie auf  $l = 250$  mm und  $b = 25$  mm festgelegt. Der Prüfkörper mit den entsprechenden Abmessungen ist schematisch in Abb. 7.1 dargestellt.



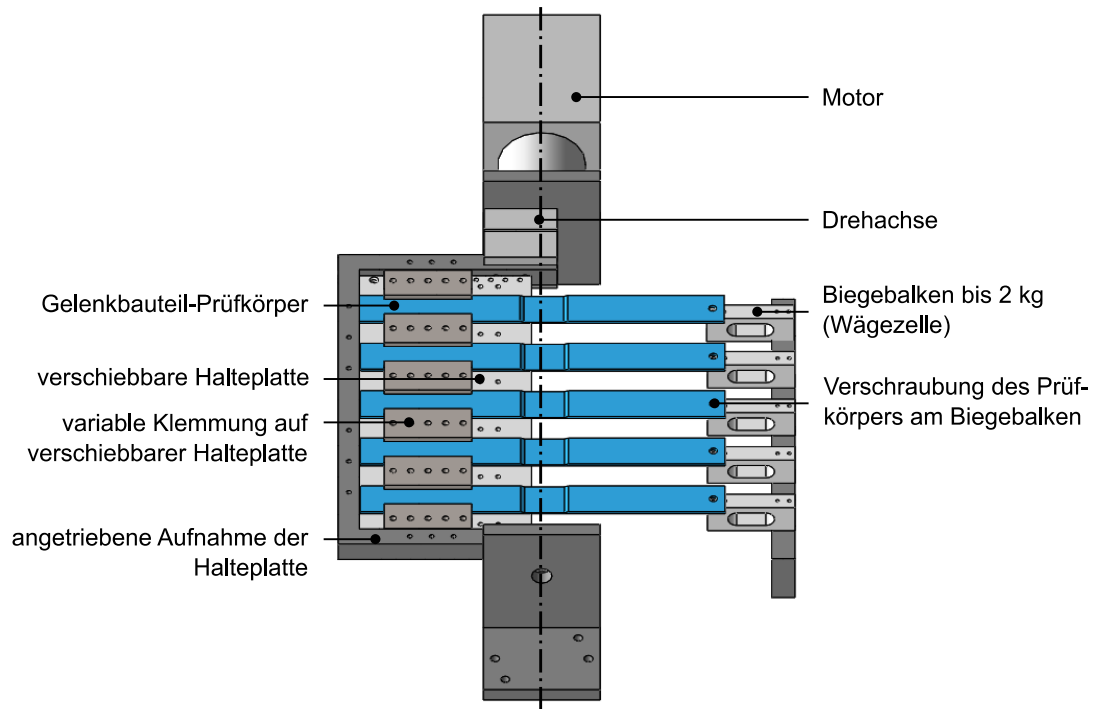
**Abb. 7.1 Gelenkbauteil-Prüfkörper für zyklische Biegeprüfung**

mit den Außenmaßen eines Zugprüfkörpers (Angaben in mm) nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] (Prüfkörpertyp 2) und (a) Bohrung zur Verschraubung des Prüfkörpers mit dem Biegebalken des Prüfstands, (b) Gelenkbereich, (c) Übergangsbereich und (d) Bauteilbereich.

Zur Befestigung im Prüfstand wird er einseitig mit einer Bohrung (Durchmesser = 5 mm) versehen. Die Bohrung ist in der Mitte der Prüfkörperbreite ( $25/2$  mm) und 10 mm entfernt vom Prüfkörperende zu setzen.

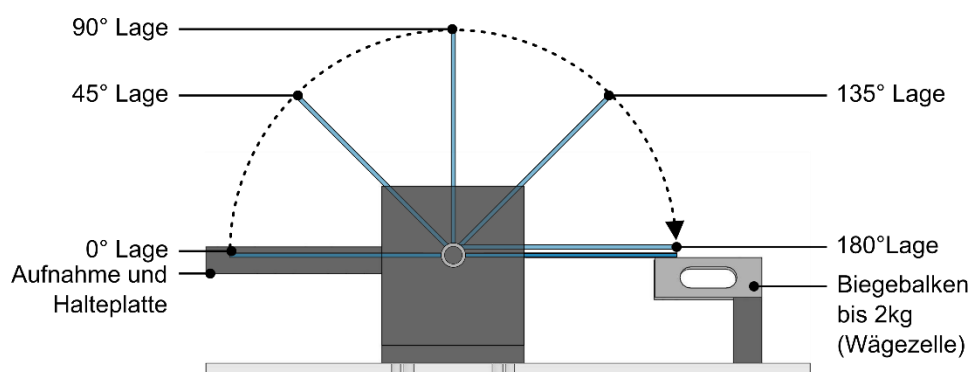
Eine schematische Zeichnung des zyklischen Biegeprüfstands selbst ist in Abb. 7.2 dargestellt. Bis zu fünf Gelenkbauteil-Prüfkörper können gleichzeitig geprüft werden. Sie werden auf einer Halteplatte einseitig unter Kunststoffklemmen fixiert. Am anderen Ende werden sie auf Biegebalken mit einer Lastaufnahme von bis zu 2 kg aufgelegt und mit diesen verschraubt. Durch diese Befestigungsform des Prüfkörpers kann die Dicke des Bauteil- und Gelenkbereichs flexibel gewählt werden.

Die Drehachse des Motors verläuft im Mittelpunkt des Querschnitts des Gelenkbereichs. Mit dem Motor wird die Aufnahme angetrieben und die Prüfkörper werden über die mitbewegte Halteplatte gebogen. Der Krafteintrag ist bei dieser Bewegung entsprechend eingangs definierter Anforderung (2) immer senkrecht.



**Abb. 7.2** Schematische Darstellung (perspektivische Aufsicht) des zyklischen Biegeprüfstands mit einer Aufnahme von bis zu fünf Gelenkbauteil-Prüfkörpern entsprechend Abb. 7.1.

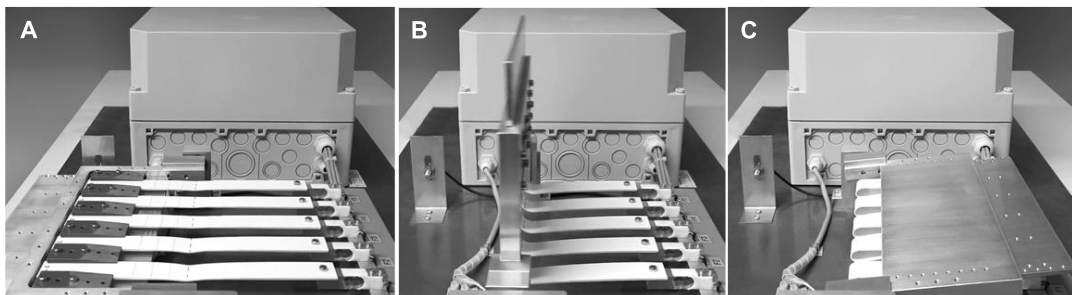
Die Biegebewegung ist in Abb. 7.3 anhand einer schematischen Seitenansicht des Prüfstandes mit verschiedenen Positionen des in der Halteplatte geklemmten Prüfkörpers dargestellt. Der Biegebalken nimmt direkt die Gewichtslast auf, die aus der Biegung des Prüfkörpers resultiert. Das Gewicht wird über das Auswertungsprogramm in die wirkende Kraft umgerechnet. Analog zu Anforderungskriterium (3) findet durch die kraftschlüssige Verbindung des Prüfkörpers mit Halteplatte und Biegebalken eine quasi reibungsfreie Messung der Kraft statt.



**Abb. 7.3** Schematische Darstellung (Seitenansicht) des zyklischen Biegeprüfstands mit skizzierten Verlauf der Biegebewegung des Gelenkbauteil-Prüfkörpers bis zu einem Biegewinkel von effektiv 180°.

Je nach Steifigkeit des Gelenk-, Übergangs-, und Bauteilbereichs stellen sich bei einer Biegebewegung bzw. dem Zuklappen der Prüfkörper unterschiedliche Biegegraden ein. Um eine Verfälschung der Messwerte durch eine Einschränkung der Verformung der Prüfkörper zu vermeiden, ist die Halteplatte in ihrer angetriebenen Aufnahme verschiebbar. Die Klemmbacken zur Fixierung auf der Halteplatte können ebenso verschoben werden. Abhängig von der Gelenkbreite kann die Klemmlänge somit verkürzt oder verlängert werden. Der technisch umgesetzte Prüfstand ist in Abb. 7.4 zu sehen.

Am Prüfstand können der minimale und maximale Biegewinkel, die Lastspielzahl, die Messfrequenz, die Geschwindigkeit der Biegebewegung und die Haltezeit bei Erreichen des max. Biegewinkels eingestellt werden. Die Anzahl der Lastspiele muss mindestens  $N = 1$  betragen. Ihr maximaler Wert wird nur durch die Speicherkapazität der im Prüfstand integrierten Speicherkarte limitiert und ist somit quasi unbegrenzt. Anforderungskriterium (4) – eine Prüfung von mindestens 5.000 Lastspielen – wird somit ebenfalls erfüllt.

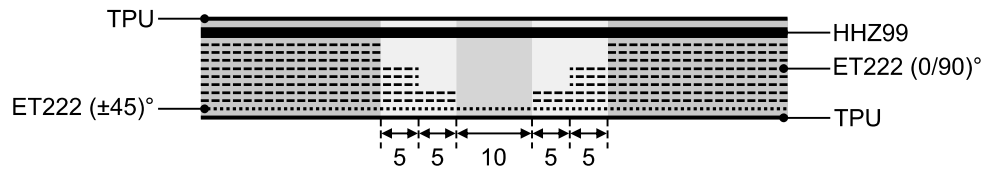


**Abb. 7.4 Zyklischer Biegeprüfstand für die Prüfung von FVK-Gelenkbauteilen;**  
A 0°-Lage, B 90°Lage, C 180°-Lage (Stellung für Haltezeit).

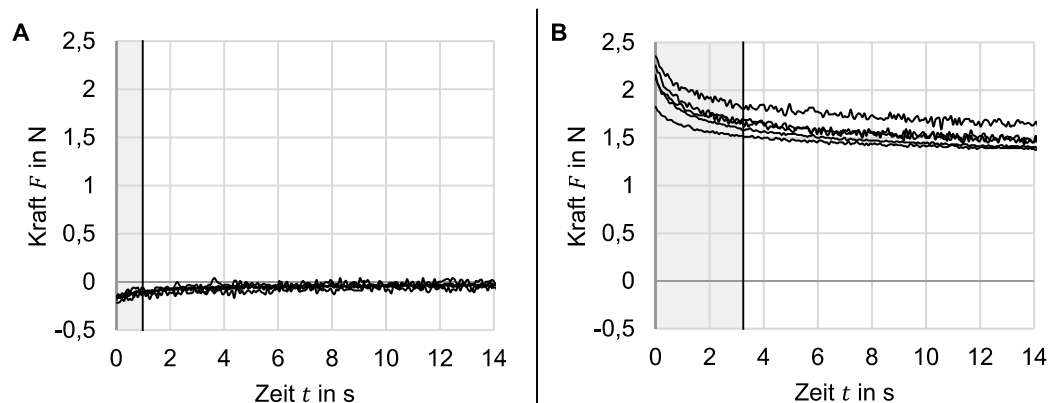
Der maximal einstellbare Winkel beträgt  $174^\circ$ . Dadurch wird eine effektive Biegung des Prüfkörpers um  $180^\circ$  gemäß dem Anforderungskriterium (1) erreicht. Der Winkel  $180^\circ$  ist nicht einstellbar, da bei dieser Einstellung die  $0^\circ$ -Lage des Prüfkörpers und die  $180^\circ$ -Lage des Prüfkörpers identisch wären, und folglich eine Kollision der Prüfkörperenden an der Stelle einer maximalen Biegung die Folge wäre. Die Geschwindigkeit ist für vergleichende Messungen identisch zu wählen, da die gemessene Kraft wie in jeder mechanischen Prüfung geschwindigkeitsabhängig ist. Innerhalb dieser Arbeit wird die Geschwindigkeit stets so eingestellt, dass sie am äußersten Ende des Prüfkörpers  $v = 100 \text{ mm/s}$  beträgt und einer Winkelgeschwindigkeit von  $v = 0,62 \text{ rad/s}$  entspricht.

Insbesondere bei relaxierenden Materialien wie bspw. der Elastomerschicht des Hybridverbunds gilt es, am Umkehrpunkt des Lastspiels (max. Biegewinkel) eine Haltezeit einzustellen, in der das Material kontrolliert relaxiert. So kann eine unkontrollierte Verfälschung der Messwerte durch die Dauer, die für den Richtungswechsel aufgrund der Massenträgheit benötigt wird, vermieden werden. Durch einen Vorversuch ist die Dauer der Haltezeit zu ermitteln, bei der sich die gemessene Kraft  $F$  nur noch minimal verändert. Innerhalb dieser

Arbeit werden ausschließlich zyklische Prüfungen mit dem Materialaufbau aus TPU, HHZ99 und ET222 durchgeführt. Die einzustellende Haltezeit wird exemplarisch für den Laminataufbau des Gelenkbauteils, der in Abb. 7.5 gezeigt ist, ermittelt und für alle Prüfungen innerhalb dieser Arbeit bei dieser Einstellung belassen.



**Abb. 7.5 Laminataufbau der Prüfkörper zur Einstellung der Haltezeit im zyklischen Biegeprüfstand (Geometrie vor dem Pressprozess).** Die Ergebnisse der Kraftmessung an den Relaxationspunkten, d. h. der  $0^\circ$ -Lage und der  $180^\circ$ -Lage (Einstellung max. Biegewinkel  $174^\circ$ ), sind in Abb. 7.6 dargestellt. Aus Abb. 7.6A wird ersichtlich, dass in der  $0^\circ$ -Lage kaum eine Veränderung der gemessenen Kraft  $F$  auftritt. Geht man von einer Sekunde Wendezeit aus, so entfallen bereits die verfälschten Messwerte für den Beginn des nächsten Lastspiels. Abb. 7.6B zeigt, dass die Haltezeit innerhalb dieser Arbeit beim maximalen Biegewinkel auf eine Dauer von 3,25 s einzustellen ist. Ab diesem Zeitpunkt ist die Reduktion der gemessenen Kraft  $F$  im Vergleich zu den ersten 3,25 s minimal und wird von der Streuung der Messwerte weitestgehend überlagert. In Anbetracht der Zeiteffizienz für die zyklische Prüfung von FVK-Gelenkbauteilen ist stets die kleinstmögliche Haltezeit einzustellen.



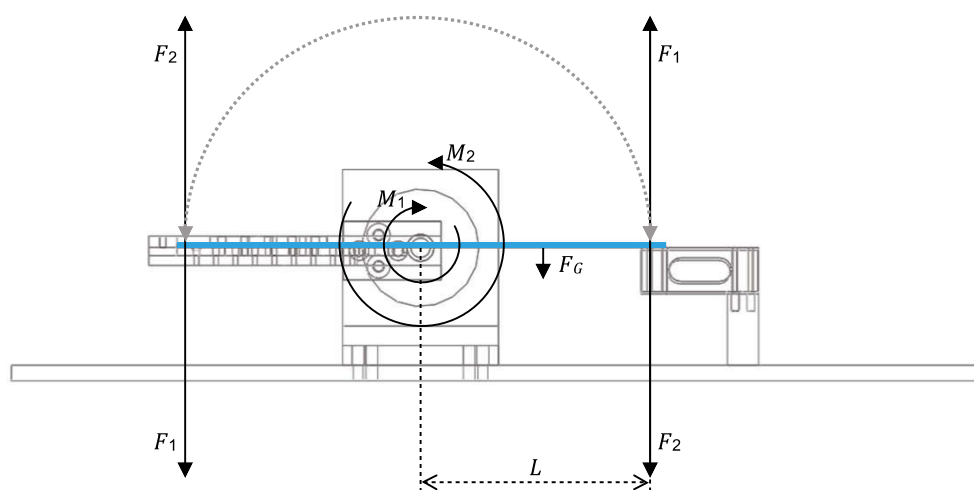
**Abb. 7.6 Einstellung der Haltezeit für die Gelenkbauteil-Prüfkörper an den Relaxationspunkten des zyklischen Biegeprüfstands**

mit TPU, HHZ99 und ET222 (Aufbau des Gelenkbauteils analog zu Abb. 5.4), die fünf Messkurven entsprechen den fünf Biegebalken bzw. fünf Gelenkbauteil-Prüfkörpern, einzustellende Haltezeit markiert durch senkrechte Linie und grau hinterlegten Bereich; **A** Änderung der gemessenen Kraft  $F$  in  $0^\circ$ -Lage des Gelenkbauteil-Prüfkörpers, **B** Änderung der gemessenen Kraft  $F$  in  $180^\circ$ -Lage Gelenkbauteil-Prüfkörpers.

## 7.2 Auswertungsmethodik für zyklische Biegeprüfungen

Um anhand der Messwerte Rückschlüsse auf die Biegeeigenschaften der Gelenkbauteil-Prüfkörper ziehen zu können, muss zunächst der für den Gelenkbauteil-Prüfkörper geltende Lastfall ermittelt werden. Ausgangspunkt für die Betrachtung der wirkenden Kräfte ist das Drehmoment, das über den Motor in den Prüfstand eingebracht wird und auf den Gelenkbauteil-Prüfkörper wirkt. Die Drehachse des Motors liegt in der Mitte des Gelenkbereichs des Prüfkörperquerschnitts.

Die Drehmomente für das Zuklappen  $M_1$  und Aufklappen  $M_2$  sind in Abb. 7.7 schematisch eingezeichnet. Dabei gilt  $M_1=M_2$ . Aus den Drehmomenten bzw. dem effektiv wirkenden Biegemoment über die Länge des Prüfkörpers resultieren die Kräfte  $F_1$  bzw.  $F_2$ .



**Abb. 7.7** Schematische Darstellung der eingetragenen Momente und resultierenden Kräfte in der zyklischen Biegeprüfung mit  $M_1$  = Drehmoment bei Zuklappen,  $M_2$  = Drehmoment bei Aufklappen,  $F_1$  = Resultierende Kraft durch Drehmoment  $M_1$  bei Zuklappen,  $F_2$  = Resultierende Kraft durch Drehmoment  $M_2$  bei Aufklappen,  $F_G$  = Gewichtskraft des Prüfkörpers und  $L$  = Stützweite.

Das durch die Kräfte auf die Biegebalken wirkende Gewicht  $m$  wird direkt, quasi ohne Reibungsverluste, entsprechend der für den Prüfstand definierten Anforderungen gemessen. Das Gewicht wird in die wirkenden Kräfte  $F_1$  bzw.  $F_2$  mit  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  umgerechnet. Da  $M_1=M_2$  ist, gilt  $F_1=F_2$ . Somit kann verallgemeinert vom Drehmoment  $M$  und der wirkenden Kraft  $F$  gesprochen werden. Neben dem durch die Kraft  $F$  bei der Biegung des Gelenkbauteil-Prüfkörpers resultierenden Gewicht  $m$  wirkt auch das Gewicht des Gelenkbauteil-Prüfkörpers selbst und somit die Gewichtskraft  $F_G$  auf den Biegebalken. Da vor Beginn der Messung, nach der Einspannung des Gelenkbauteil-Prüfkörpers und dem Referenzieren der  $0^\circ$ -Lage, ein Null-Abgleich des gemessenen Gewichts  $m$  durchgeführt wird, ist die Gewichtskraft  $F_G$  in der Messung allerdings zu vernachlässigen. Bedingt durch das mittig eingetragene Drehmoment  $M$  und der auf das Ende des Prüfkörpers wirkenden

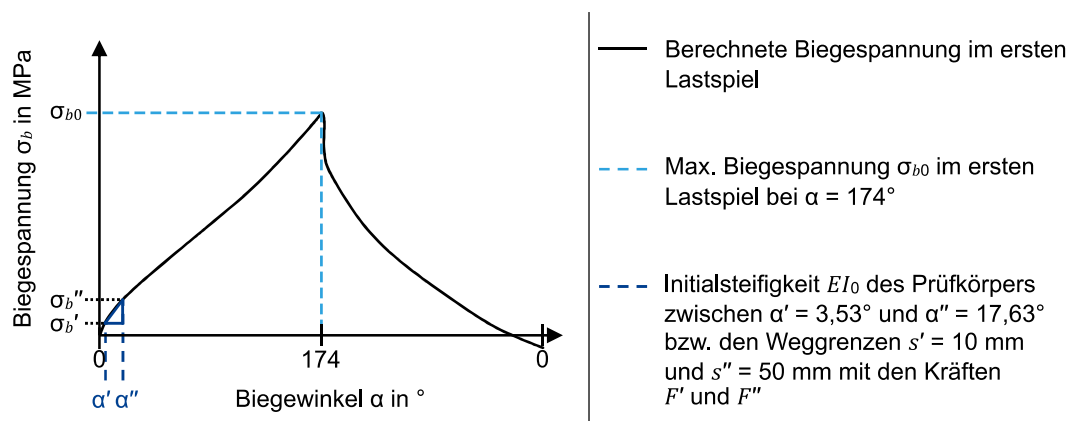
Kraft  $F$  kann mit einer Stützweite  $L = l_{\text{Prüfkörper}}/2 - s_{\text{Bohrung}} = 115 \text{ mm}$  der 2-Punkt-Biege-  
lastfall angenommen werden.

Es gelten daher entsprechend der in Kapitel 4.3.1 dargestellten 2-Punkt-Biegeprüfung die  
Formeln (4.1) und (4.2) zur Berechnung der Biegespannungen  $\sigma_b$  und -steifigkeit  $EI$ .

$$\sigma_b = \frac{6FL}{bh^2} \quad (4.1)$$

$$EI = \frac{\Delta F \cdot L^3}{3 \cdot \Delta s} \quad (4.2)$$

Bei der zyklischen Biegeprüfung sind allerdings im Vergleich zu der in Kapitel 4.3.1  
gezeigten 2-Punkt-Biegeprüfung andere Durchbiegungen für die Bestimmung von  $\Delta s$  und  
 $\Delta F$  zu beachten. Die exemplarische Messkurve des ersten Lastspiels in Abb. 7.8 zeigt die  
Biegespannung  $\sigma_b$  abhängig von der elastischen Verformung des Gelenkbauteil-Prüfkör-  
pers.

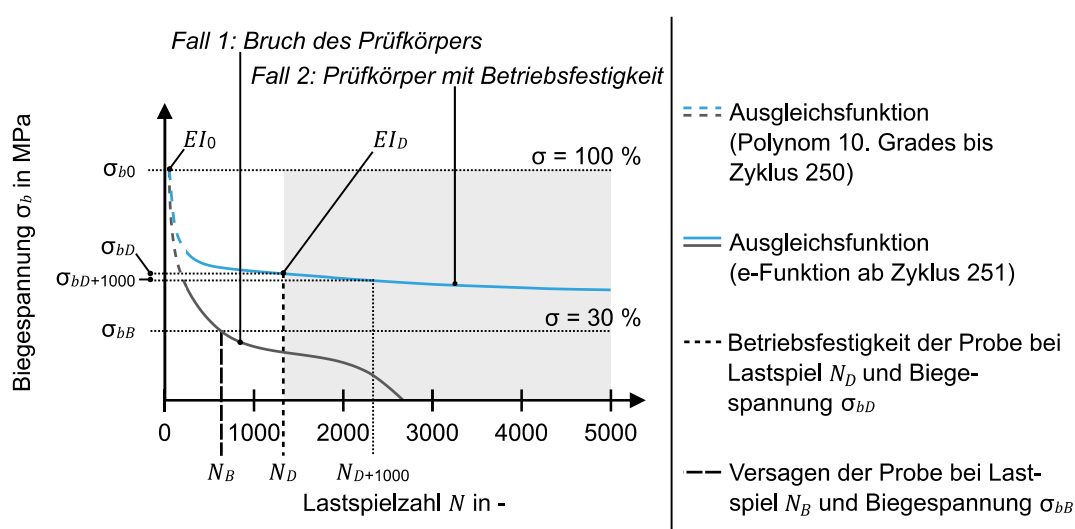


**Abb. 7.8 Exemplarische Darstellung der Kenngrößen zur Bestimmung von Biegespannung  $\sigma_b$  und Biegesteifigkeit  $EI$  im ersten Lastspiels der zyklischen Biegeprüfung.**

Die Biegesteifigkeit  $EI$  wird innerhalb der Weggrenzen  $s' = 10 \text{ mm}$  und  $s'' = 50 \text{ mm}$  (Länge des Kreisbogens bei Verformung des Prüfkörpers mit dem Radius  $r = L = 125 \text{ mm}$ ) berechnet. Diese entsprechen den Biegewinkeln  $\alpha' = 3,53^\circ$  und  $\alpha'' = 17,63^\circ$ . Die Weggrenzen wurden so gewählt, dass die Steifigkeit  $EI$  in dem Bereich der Messung bestimmt wird, in dem die Steifigkeit  $EI$  des Gelenkbauteil-Prüfkörpers initial überwunden und die höchste Steifigkeit messbar ist. Für diese beiden Messpositionen werden die Werte von  $F'$  und  $F''$  ermittelt und über das Steigungsdreieck die Steifigkeit  $EI$  des Gelenkbauteil-Prüfkörpers bestimmt. Darüber hinaus wird die maximal auftretende Biegespannung  $\sigma_{b0}$  beim maximalen Biegewinkel  $\alpha_{max}$  berechnet. In Abb. 7.8 beträgt er exemplarisch  $174^\circ$  und entspricht somit einer effektiven Biegung des Prüfkörpers um  $180^\circ$ . Analog zu Anforderungskri-

terium (6) sind die initialen Biegeeigenschaften des Gelenkbauteils  $EI_0$  und  $\sigma_{b0}$  im ersten Lastspiel bestimmbar.

Im Vergleich zu anderen Prüfverfahren zur Bestimmung der Kurz- und Langzeitfestigkeit wie sie bspw. aus DIN 50100:2016 [33] für metallische Werkstoffe bekannt sind, ist bei der zyklischen Biegeprüfung die Verformung und nicht die eingetragene Kraft konstant. Aufgrund der sich ändernden Biegespannung  $\sigma_b$  über die Lastspielzahl  $N$  werden die Maxima der Biegespannung für alle Lastspiele bestimmt. Durch die ermittelten Maxima wird im Zuge der Bestimmung der Betriebsfestigkeit eine Ausgleichskurve gelegt. Die Ausgleichskurve und die nachfolgend erklärten Auswertungskriterien der zyklischen Biegeprüfung sind in Abb. 7.9 schematisch dargestellt.



**Abb. 7.9** Schematische Darstellung der Bestimmung von Betriebsfestigkeit/-lastspiel und Bruchfestigkeit/-lastspiel in der zyklischen Biegeprüfung mit den zwei auftretenden Fällen (1) Bruch des Prüfkörpers nach  $N_B$  Lastspielen oder (2) Erreichen der Betriebsfestigkeit nach  $N_D$  Lastspielen.

Bedingt durch den starken Abfall der maximalen Biegespannungen innerhalb der ersten Lastspiele, besteht die Ausgleichskurve aus zwei Teilen: Bis zum 250. Lastspiel handelt es sich um ein Polynom 10. Grades; ab dem 251. Lastspiel bis zum letzten geprüften Lastspiel bildet eine e-Funktion die Ausgleichskurve der Biegespannungsmaxima ab.

Die Betriebsfestigkeit des Gelenkbauteil-Prüfkörpers ist erreicht, wenn gilt:

$$\sigma_{bD+1000} - \sigma_{bD} < \sigma_{bD} \cdot 0,05 \quad (7.1)$$

Der Wert der maximalen Biegespannung  $\sigma_b$  ändert sich folglich über eine Dauer von 1.000 Lastspielen nicht mehr als 5 %. Die Lastspielzahl  $N_D$ , für die diese Bedingung zum ersten Mal erfüllt ist, gilt als Beginn der Betriebsfestigkeit. In diesem Lastspiel werden sowohl die maximale Biegespannung  $\sigma_{bD}$  als auch die Biegesteifigkeit  $EI_D$  bestimmt. Die Auswer-



tung erfüllt somit die eingangs definierten Anforderungskriterien (7) und (8). Sofern das Gelenkbauteil im Dauerbetrieb eingesetzt werden soll, muss die Auslegung auf Basis der Werte der Betriebsfestigkeit erfolgen.

Das Kriterium für das Versagen des Gelenkbauteil-Prüfkörpers ist eine Abnahme der gemessenen Biegespannung  $\sigma_b$  im Maximum von 70 % bzw. einer verbleibenden Biegespannung von 30 % der initial gemessenen Biegespannung:

$$\sigma_{bmax} < 0,3 \cdot \sigma_{b0} \quad (7.2)$$

Das Versagenskriterium (7.2) basiert auf Vorversuchen, die innerhalb dieser Arbeit nicht im Detail dargestellt werden. Ein definierter Bruch wie bspw. im Zugversuch (vgl. Kapitel 4.3.4) mit einem abrupten Kraftabfall findet in der zyklischen Biegeprüfung nur im Ausnahmefall statt. Für Prüfkörper, deren Biegespannung unter  $0,3 \cdot \sigma_{b0}$  sinkt, ist entweder eine starke Schädigung des Gelenkbereichs makroskopisch und mikroskopisch oder ein tatsächlicher Bruch des Laminats erkennbar. Für das Lastspiel  $N_B$ , in dem das Versagenskriterium (7.2) zutrifft, wird die Biegespannung  $\sigma_{bB}$  als Einzelwert bestimmt. Dieser Teil der Auswertung der zyklischen Biegeprüfung entspricht dem Anforderungskriterium (9).

Im Anschluss an die zyklische Biegeprüfung kann, sofern das Kriterium der Betriebsfestigkeit (7.1) und nicht das Versagenskriterium (7.2) erfüllt wird, eine Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] durchgeführt werden. Die dadurch ermittelte Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  gibt gemäß dem Anforderungskriterium (5) Aufschluss über die Schädigung des Gelenkbauteils durch die zyklische Biegebeanspruchung. Somit kann dieser Restzugfestigkeitswert  $\sigma_{ZR}$ , neben der Betriebsbiegesteifigkeit  $EI_D$  und der maximal auftretenden Biegespannung im Dauerbetrieb  $\sigma_{bD}$ , für die Auslegung eines FVK-Gelenkbauteils im Anwendungsfall herangezogen werden.

## Zusammenfassung der entwickelten Prüfmethodik

Bisher bekannte Prüfmethoden für die Untersuchung der Biegeeigenschaften sehen die zerstörende Prüfung unter kleinen Deformationswinkeln vor. Die Verformung in diesen Prüfungen entspricht nicht der Verformung, die ein FVK-Gelenkbauteil bei der Anwendung in adaptiven Fassadenbauteilen, deren Bewegungsprinzip auf Faltungsprinzipien beruht, erfährt. Hier sind Biegewinkel von bis zu  $180^\circ$  möglich. Darüber hinaus können mit bisherigen Biegeprüfungen die Festigkeitseigenschaften des Materials nach zyklischer Belastung nicht anhand von genormten Prüfungen bestimmt werden. Die ermittelten mechanischen Kenndaten sind daher nicht vergleichbar mit anderen Kennwerten und können nicht zur Bauteilauslegung genutzt werden.

Die innerhalb dieser Arbeit entwickelte zyklische Biegeprüfvorrichtung für FVK-Gelenkbauteil-Prüfkörper sieht dagegen die Prüfung von Prüfkörpern mit den Abmaßen eines

Zugprüfkörpers nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] vor. Dadurch ist die Ermittlung mechanischer Kennwerte nach der zyklischen Beanspruchung im Prüfstand möglich, die zur Auslegung von FVK-Gelenkbauteilen herangezogen werden können. Daneben erfüllt die zyklische Biegeprüfung selbst alle eingangs gestellten Anforderungen (1) bis (9), bspw. die reibungsfreie Kraftmessung und die Biegung des Prüfkörpers um bis zu  $180^\circ$ , und kann für die Ermittlung und Analyse mechanischer Kennwerte als Basis für die Ableitung eines Auslegungsmodells für FVK-Gelenkbauteile verwendet werden. Die Arbeitshypothese (3), nach der die Prüfung der Biege- und Zugfestigkeitseigenschaften durch die Entwicklung, Umsetzung und Bereitstellung einer geeigneten Prüfmethodik möglich ist, kann folglich bestätigt werden.

## 8. Auslegungsmodell für Gelenkbauteile

Durch die Überprüfung der Arbeitshypothesen (1) (vgl. Kapitel 5), (2) (vgl. Kapitel 6) und (3) (vgl. Kapitel 7) steht ein Materialaufbau zur Verfügung, dessen Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  und Biegesteifigkeit  $EI$  berechenbar sind. Darüber hinaus liegt eine Prüfmethodik vor, die es ermöglicht FVK-Gelenkbauteile hinsichtlich ihrer initialen mechanischen Eigenschaften und derer im Dauerbetrieb zu charakterisieren. Die Ergebnisse der bisherigen Kapitel bilden somit die Grundlage für die Untersuchung der Auslegungskriterien für FVK-Gelenkbauteile, so dass die mechanischen Eigenschaften des FVK-Gelenkbauteils gezielt verändert werden können, um bspw. die Betriebsfestigkeit bzw. die verbleibende Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach einer bestimmten Anzahl Lastspiele zu erhöhen. Gemäß der Arbeitshypothese (4) können durch eine Änderung der Geometrie des Gelenkbauteils die Beanspruchungen in den einzelnen Komponenten reduziert und folglich die Festigkeit des FVK-Gelenkbauteils erhöht werden. Innerhalb von Kapitel 8 werden die Einflussfaktoren, die bei der Einstellung der mechanischen Eigenschaften Berücksichtigung finden müssen, herausgearbeitet und mechanisch analysiert. Auf Basis der mechanischen Eigenschaften wird ein analytisches Regressionsmodell aufgestellt, das die gezielte Anpassung des Laminataufbaus und der Gelenkgeometrie zur Einstellung der Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach 5.000 Lastspielen (vgl. Anforderungen Kapitel 5) eines FVK-Gelenkbauteils ermöglicht.

### 8.1 Bestimmung der relevanten Auslegungskriterien

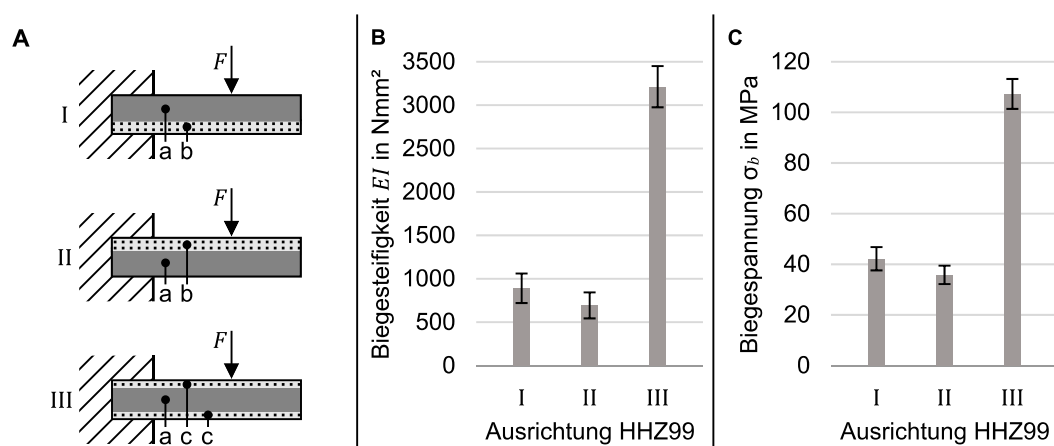
Für die Anwendung eines FVK-Gelenkbauteils in adaptiven Fassadenverschattungen ist zum einen die Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  des Gelenk- und Bauteilbereichs relevant, insbesondere die verbleibende Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach der Biegebelastung des Gelenkbauteils mit einer definierten Lastspielzahl. Die Zugfestigkeit eines FVK-Gelenkbauteils wird durch die zyklische Biegebelastung in geringerem Maß reduziert, wenn die Biegespannungen möglichst gering sind. Es ist bereits bekannt, dass die resultierenden Beanspruchungen im Material bei der Biegebewegung am geringsten sind, wenn die Faserorientierung im Gelenkbereich  $(\pm 45)^\circ$  beträgt [12, 88, 101]. Zum anderen ist neben der Zugfestigkeit die Biegesteifigkeit des Gelenkbereichs für die Bauteilauslegung entscheidend, da auf Basis der Biegesteifigkeit der Aktuierungsmechanismus des adaptiven Fassadenbauteils dimensioniert werden muss. Grundsätzlich sind folglich Biegespannung  $\sigma_b$  und -steifigkeit  $EI$  sowie die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach einer definierten Anzahl Lastspiele  $N$  in ein Auslegungsmodell für adaptive FVK-Gelenkbauteile einzubeziehen.

Innerhalb von Kapitel 8.1 werden die nachstehenden Faktoren für die Auslegung von Gelenkbauteilen untersucht, von denen angenommen wird, dass sie einen Einfluss auf die

Biegespannungen  $\sigma_b$  und -steifigkeiten  $EI$  bzw. die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  eines FVK-Gelenkbauteils nach einer bestimmten Lastspielzahl  $N$  haben.

- (1) Position der Elastomer-Schicht (HHZ99) im Hybridverbund
- (2) Breite des Gelenkbereichs  $b_G$
- (3) Breite des Übergangsbereichs  $b_U$
- (4) Steifigkeitsverhältnis zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich
- (5) Biegewinkel  $\alpha$

Die Schichten im Gelenkbereich des Hybridverbunds sind ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$ , TPU und HHZ99. Das TPU wird generell auf beiden Außenseiten des Gelenkbauteils aufgebracht. Allerdings gilt es, die Position der HHZ99- bzw. ET222-Schicht im Hybridverbund in Relation zur Biegebewegung so zu wählen, dass die Biegespannungen minimal sind, um eine potentielle Schädigung des Bauteils durch die Biegebeanspruchung so gering wie möglich zu halten. In vergleichenden 2-Punkt-Biegeprüfungen (vgl. Kapitel 4.3.1) werden drei verschiedene Materialaufbauten untersucht, die aus zwei Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  (textiles Flächengewicht  $m_A = 330 \text{ g/m}^2$ ) und einer Schicht HHZ99 bestehen. Ihr Aufbau in Relation zur Biegekraft, die über die Druckfinne eingebracht wird, sind in Abb. 8.1A dargestellt.



**Abb. 8.1 Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung mit Variation der Position von HHZ99 in Relation zur eingetragenen Kraft  $F$  ( $n = 5$ );**

**A** Untersuchte Laminataufbauten mit (a) einer Schicht HHZ99 ( $h = 0,49 \text{ mm}$ ), (b) zwei Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  ( $h = 0,24 \text{ mm}$ ) und (c) einer Schicht ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  ( $h = 0,12 \text{ mm}$ ), **B** Biegesteifigkeit  $EI$  abhängig von Position der HHZ99-Schicht in Relation zur eingetragenen Kraft  $F$ , **C** Biegespannung  $\sigma_b$  abhängig von Position der HHZ99-Schicht in Relation zur eingetragenen Kraft  $F$ .

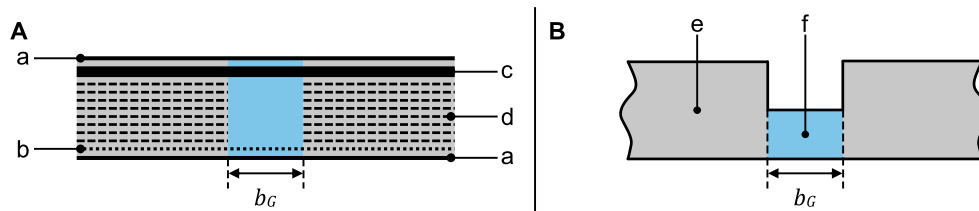
In Aufbau (I) liegt die HHZ99-Schicht auf der Zugseite unter Biegebelastung. Auf der Druckseite befinden sich die zwei Schichten ET222. Diese Anordnung ist bei Aufbau (II) gespiegelt: Die HHZ99-Schicht liegt auf der Druckseite unter Biegebelastung und die zwei Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  auf der Zugseite. In Aufbau (III)

wird die HHZ99-Schicht zwischen den zwei Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  eingebracht.

In Abb. 8.1B und Abb. 8.1C sind die Ergebnisse aus der mechanischen Prüfung für die Biegesteifigkeit  $EI$  und -spannung  $\sigma_b$  dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Steifigkeit als auch die resultierenden Biegespannungen von Aufbau (III) am höchsten ist. Der Aufbau (III) entspricht dem Prinzip eines Sandwichbauteils, bei dem die versteifenden Materialschichten am weitesten von der biegeneutralen Ebene entfernt sind. Durch diese Anordnung wird die Steifigkeit  $EI$  erhöht, und folglich ist auch die aus der Biegebewegung resultierende Biegespannung  $\sigma_b$  höher. Der Unterschied zwischen den Aufbauten (I) und (II) ist als geringer einzustufen: Mit  $693,34 \text{ Nmm}^2$  ist die Biegesteifigkeit von Aufbau (II) ca. 22,12 % niedriger als die von Aufbau (I). Die resultierende Biegespannung  $\sigma_b$  ist bei Aufbau (II) mit  $35,82 \text{ MPa}$  ebenfalls ca. 15,10 % niedriger als bei Aufbau (I). Der Druckverformungswiderstand von HHZ99 (Härte  $R1 = 91 \text{ Shore A}$ ) ist folglich geringer als der E-Modul ( $E = 15,98 \text{ MPa}$ ) der ET222-Schicht mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  (vgl. Tab. 6.1).

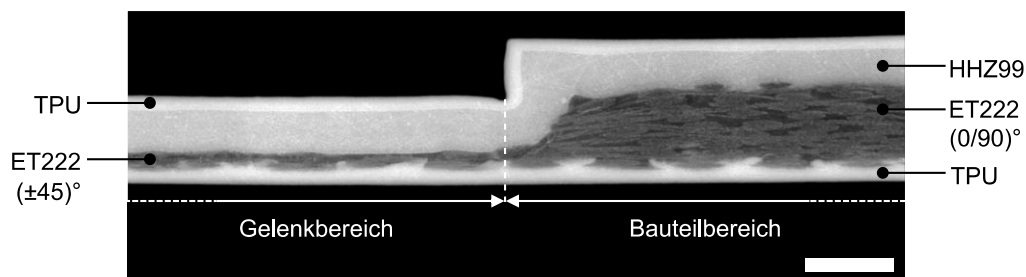
In Kapitel 5.2 wurde bereits festgelegt, dass die HHZ99-Schicht stets auf der Seite des Gelenkbauteils liegen muss, die aufgrund der Dünnstelle im Gelenk- und Übergangsbereich während der Herstellung bzw. dem Pressprozess tiefgezogen wird (vgl. Laminataufbau und Gelenkbauteil-Geometrie in Abb. 8.2). Die Ergebnisse der Untersuchung der Position der Elastomer-Schicht (HHZ99) im Hybridverbund zeigen darüber hinaus, dass die aus der Biegebewegung resultierenden Materialspannungen am geringsten sind, wenn die HHZ99-Schicht auf der Druckseite liegt (vgl. Abb. 8.1, Aufbau (II)). Auf dieser Grundlage wird festgelegt, dass die HHZ99-Schicht bei Biegebelastung eines Gelenkbauteils aus den festgelegten Hybridverbundmaterialien HHZ99, TPU und ET222 auf der Druckseite liegen muss (vgl. Prüfaufbau in Abb. 8.4).

Neben der Position der HHZ99-Schicht im Verbund ist aus Kapitel 5.1 und 6 bekannt, dass die Biegesteifigkeit  $EI$  und Zugfestigkeit  $\sigma_z$  im Gelenkbereich mit zunehmender Anzahl Schichten ET222 mit einer Faserorientierung  $(\pm 45)^\circ$  ansteigt. Es wird überdies angenommen, dass sowohl die Breite des Gelenkbereichs  $b_G$  als auch die Breite des Übergangsbereichs  $b_U$  einen Einfluss auf die resultierende Biegesteifigkeit  $EI$  bzw. Biegespannung  $\sigma_b$  haben. Der Laminataufbau zur Prüfung der Gelenkbreite  $b_G$  ist in Abb. 8.2A dargestellt. Im Gelenkbereich ist eine Schicht ET222  $(\pm 45)^\circ$  eingebracht und im Bauteilbereich zusätzlich acht versteifende Schichten ET222  $(0/90)^\circ$ . Die geprüften Gelenkbauteile haben keinen Übergangsbereich. Die Außengeometrie der Prüfkörper, die sich durch den Pressprozess ergibt, ist in Abb. 8.2B schematisch dargestellt. Es werden die Gelenkbreiten  $b_G = 10 \text{ mm}$ ,  $20 \text{ mm}$  und  $30 \text{ mm}$  geprüft.



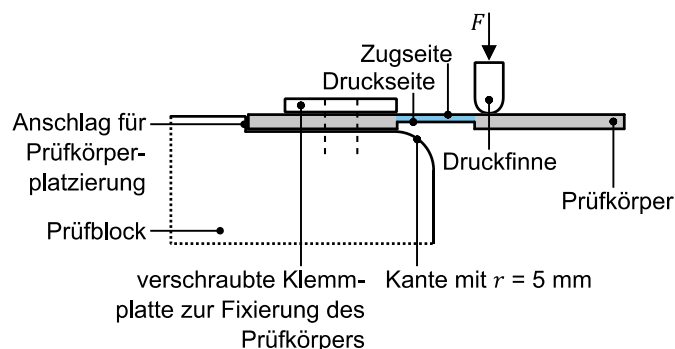
**Abb. 8.2 Schematische Darstellung der Gelenkbauteil-Prüfkörper für die Untersuchung der Gelenkbreite  $b_G$  in der 2-Punkt-Biegeprüfung;**  
**A** Laminataufbau vor dem Pressprozess mit (a) TPU, (b) ET222 ( $\pm 45^\circ$ ), (c) HHZ99, (d) ET222 ( $0/90^\circ$ ), **B** Geometrie nach dem Pressprozess mit (e) Bauteilbereich, (f) Gelenkbereich.

In Abb. 8.3 ist eine Schlibbildaufnahme des Übergangs zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit  $b_G = 20$  mm dargestellt.



**Abb. 8.3 Mikroskopieaufnahme einer Schlibbildprobe eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit  $b_G = 20$  mm, Laminataufbau nach Abb. 8.2 (Maßstab 1 mm).**

In der 2-Punkt-Biegeprüfung liegt die im Gelenkbauteil eingebrachte HHZ99-Schicht unten, also auf der Druckseite bei Biegebelastung. Folglich liegt die geprägte Seite des Gelenkbauteils auf der Unterseite und die Druckfinne trifft beim Krafteintrag auf die ebene Seite des Prüfkörpers. Die Prüfkörper einspannung ist schematisch in Abb. 8.4 dargestellt.

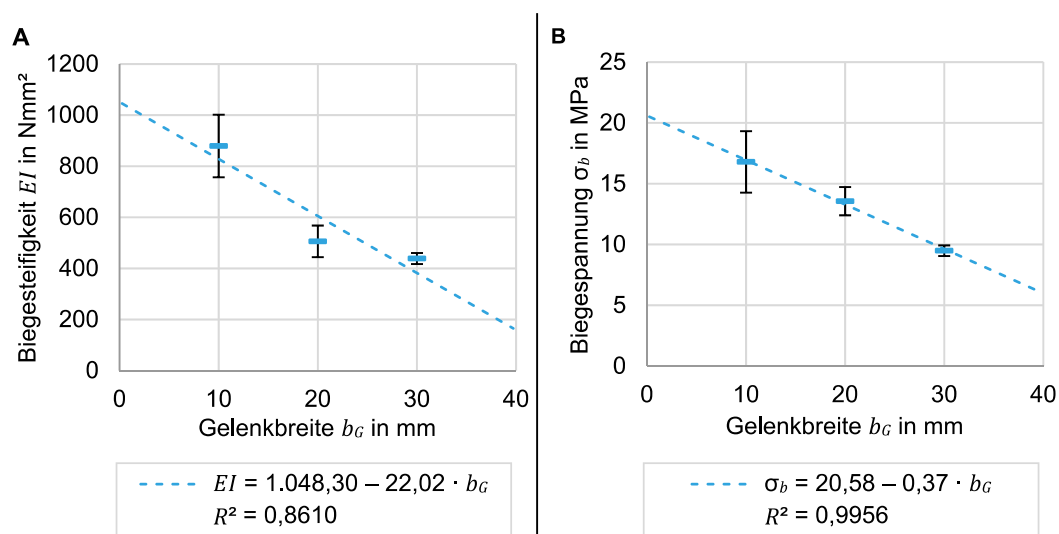


**Abb. 8.4 Einspannung von Gelenkbauteil-Prüfkörpern in der 2-Punkt-Biegeprüfung in Anlehnung an DIN 53121:2014 [29] mit der HHZ99-Schicht eines Gelenkbauteils bzw. der geprägten Seite auf der Druckseite unter Biegelast.**

Diese Prüfkörper einspannung hat neben der Reduktion der resultierenden Biegespannungen durch die auf der Druckseite liegende HHZ99-Schicht den Vorteil, dass die gemess-

senen Kraftwerte nicht durch das Ableiten der Druckfinne auf einer unebenen Oberfläche verfälscht werden.

Die resultierenden Biegesteifigkeiten  $EI$  und -spannungen  $\sigma_b$  in Abhängigkeit von der Gelenkbreite  $b_G$  sind in Abb. 8.5 dargestellt. Die Messwerte weisen sowohl im Bereich der kleinen Durchbiegungen bei der Bestimmung der Biegesteifigkeit  $EI$ , als auch im Bereich der maximal auftretenden Biegespannungen  $\sigma_b$ , insbesondere bei den Gelenkbreiten  $b_G = 10$  mm und 20 mm, hohe Streuungen auf. Bei der Prüfung dieser Gelenkbreiten liegt der Steifigkeitssprung zwischen Gelenk- zu Bauteilbereich näher an dem verformten Gelenkbereich. Es ist anzunehmen, dass sich das Epoxidharz der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  unregelmäßig an der Grenze des Gelenk- und Bauteilbereichs anlagert. Die Viskosität des Epoxidharzes wird im Pressprozess zunächst reduziert, und es wird fließfähig, bevor es vernetzt. Aufgrund der Gewebestruktur von ET222 können somit Kavitäten im Grenzbereich zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich mit Epoxidharz aufgefüllt werden. Je näher der Steifigkeitssprung an der Mitte des untersuchten Gelenkbereichs, desto größer die Beeinflussung der gemessenen Kräfte durch diese Anlagerungen. Bei  $b_G = 30$  mm treten vergleichsweise geringe Streuungen auf, so dass hier davon auszugehen ist, dass der Steifigkeitssprung so weit entfernt von der Mitte des Gelenkbereichs ist, dass diese Randeffekte die gemessenen Kräfte nicht beeinflussen.



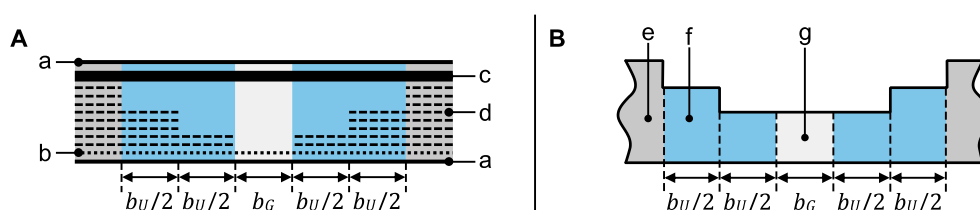
**Abb. 8.5 Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung mit unterschiedlichen Gelenkbreiten  $b_G$  (Einspannung mit HHZ99 auf der Druckseite) ( $n = 5$ );**

**A** Biegesteifigkeit  $EI$  abhängig von der Gelenkbreite  $b_G$  und lineare Regressionsfunktion mit Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , **B** Biegespannung  $\sigma_b$  abhängig von der Gelenkbreite  $b_G$  und lineare Regressionsfunktion mit Bestimmtheitsmaß  $R^2$ .

Trotz der Streuungen kann ein linearer Trend mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,8610$  für die Biegesteifigkeit  $EI$  bzw.  $R^2 = 0,9956$  für die Biegespannung  $\sigma_b$  ermittelt werden. Die Regressionsfunktion ist in Abb. 8.5 dargestellt. Je breiter der Gelenkbereich,

desto geringer die Biegesteifigkeit  $EI$  und Biegespannung  $\sigma_b$ . Dieser Effekt wird bedingt durch die höhere Nachgiebigkeit des Prüfkörpers bei der Verbreiterung des Gelenkbereichs: Es entsteht eine größere Fläche mit geringerer Steifigkeit, auf die die Verformung in der Biegebewegung gleichmäßig verteilt wird.

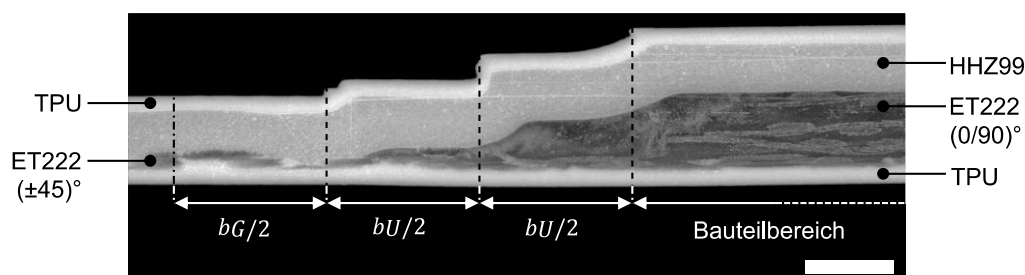
Es ist anzunehmen, dass die Verbreiterung des Übergangsbereichs einen ähnlichen Effekt auf die Biegesteifigkeit  $EI$  bzw. die Biegespannungen  $\sigma_b$  des Gelenkbauteils hat. Daher werden vergleichende Prüfungen bei konstanter Gelenkbreite  $b_G = 10$  mm sowie drei verschiedenen Übergangsbreiten  $b_U$  (0 mm, 5 mm und 10 mm) durchgeführt. Der Laminataufbau und die durch den Pressprozess resultierende Querschnittsgeometrie sind in Abb. 8.6 schematisch dargestellt.



**Abb. 8.6 Schematische Darstellung der Gelenkbauteil-Prüfkörper für die Untersuchung der Übergangsbreite  $b_U$  in der 2-Punkt-Biegeprüfung;**

A Laminataufbau vor dem Pressprozess mit (a) TPU, (b) ET222 ( $\pm 45^\circ$ ), (c) HHZ99, (d) ET222 ( $0/90^\circ$ ), B Geometrie nach dem Pressprozess mit (e) Bauteilbereich, (f) Übergangsbereich und (g) Gelenkbereich.

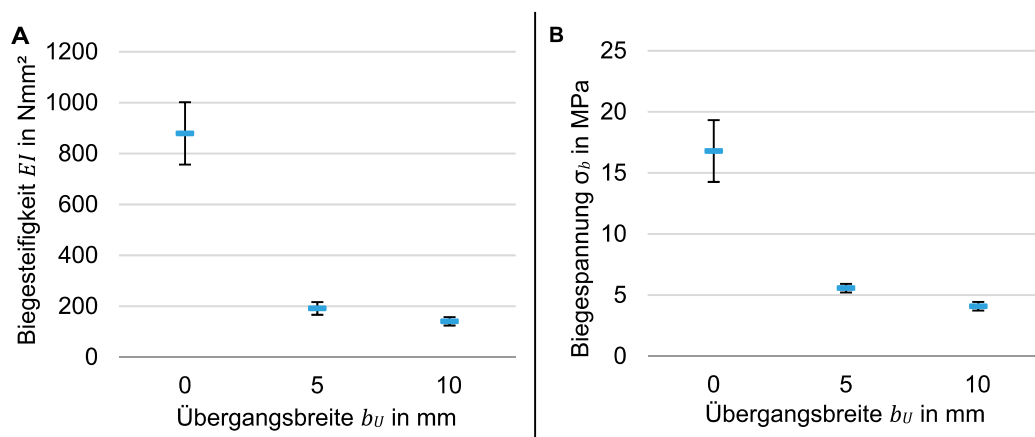
Der Laminataufbau und die Querschnittsgeometrie der Einstellung  $b_G = 10$  mm und  $b_U = 0$  mm, dem Vergleichsprüfkörper ohne Übergangsbereich, entsprechen dem in Abb. 8.2 bzw. Abb. 8.3 gezeigten Aufbau. Die Schrittweite der Abstufung der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von ( $0/90^\circ$ ) ist  $b_U/2$ . Das bedeutet, dass die unteren zwei Schichten an den Gelenkbereich angrenzen, die nachfolgenden drei in der Mitte des Übergangsbereichs enden ( $b_U/2$ ) und die oberen drei Schichten mit dem Bauteilbereich abschließen. In Abb. 8.7 ist eine Mikroskopieaufnahme des Übergangs zwischen dem Bauteil- und Gelenkbereich eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit  $b_G = 10$  mm und  $b_U = 5$  mm dargestellt.



**Abb. 8.7 Mikroskopieaufnahme einer Schlibbildprobe eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit  $b_G = 10$  mm und  $b_U = 5$  mm, Laminataufbau nach Abb. 8.6 (Maßstab 1 mm).**



Die Ergebnisse der Biegesteifigkeit  $EI$  und -spannung  $\sigma_b$  aus der mechanischen Prüfung sind in Abb. 8.8 dargestellt. Es ist festzustellen, dass sowohl die Biegesteifigkeit  $EI$  als auch die Biegespannung  $\sigma_b$  durch die Abstufung der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  deutlich reduziert wird. Mit  $EI = 191,39 \text{ Nmm}^2$  entspricht die Biegesteifigkeit des Prüfkörpers mit  $b_U = 5 \text{ mm}$  ca. 21,77 % der Biegesteifigkeit  $EI$  des Prüfkörpers mit  $b_U = 0 \text{ mm}$ . Bei der Verbreiterung des Übergangsbereichs um weitere 5 mm auf  $b_U = 10 \text{ mm}$  reduziert sich die Biegesteifigkeit im Vergleich zu  $b_U = 5 \text{ mm}$  um weitere 26,43 %. Die Biegespannungen werden in einem ähnlichen Maß reduziert (vgl. Abb. 8.8B): Durch einen Übergangsbereich mit  $b_U = 5 \text{ mm}$  sind diese bei einer Gelenkbreite von  $b_G = 10 \text{ mm}$  um ca. 66,87 % reduziert. Durch die Verbreiterung des Übergangsbereichs auf  $b_U = 10 \text{ mm}$  werden die Biegespannungen im Vergleich zu  $b_U = 5 \text{ mm}$  wiederum um ca. 26,61 % verkleinert.



**Abb. 8.8 Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung mit unterschiedlichen Übergangsbreiten  $b_U$  (Einspannung mit HHZ99 auf der Druckseite) ( $n = 5$ );**

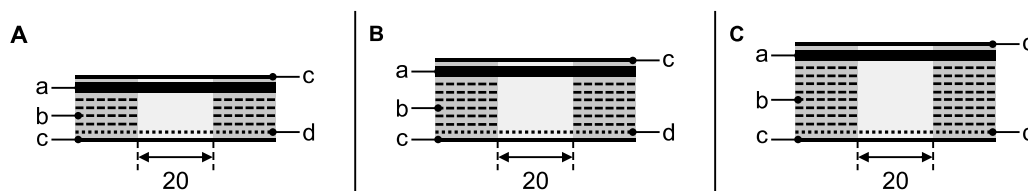
**A** Biegesteifigkeit  $EI$  abhängig von der Breite des Übergangsbereichs  $b_U$ , **B** Biegespannung  $\sigma_b$  abhängig von der Breite des Übergangsbereichs  $b_U$ .

Die Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass ein Übergangsbereich generell zu einer Reduktion der Biegesteifigkeit  $EI$  und -spannung  $\sigma_b$  in der Biegebelastung eines Gelenkbauteils führt. Es ist allerdings anzunehmen, dass sich, ab einer bestimmten Gesamtbreite des Gelenk- und Übergangsbereichs ( $b_G + 2b_U$ ), für die Biegesteifigkeit  $EI$  und -spannung  $\sigma_b$  ein konstantes Niveau einstellt. Der nachgiebige Bereich des Gelenkbauteils ist in dem Fall so groß, dass der Steifigkeitssprung zum Bauteilbereich im Hinblick auf die resultierenden Kräfte bei der Biegebewegung vernachlässigbar ist.

Zusammenfassend kann hinsichtlich der äußeren Geometrie bereits an dieser Stelle der Untersuchungen die Aussage getroffen werden, dass die Gelenkbreite  $b_G$  einen linearen Einfluss auf die Biegesteifigkeit  $EI$  des Gelenkbauteils und die Biegespannung  $\sigma_b$  hat. Für die Breite des Übergangsbereichs  $b_U$  ist zu vermuten, dass diese ebenso einen reduzierenden Effekt auf Biegesteifigkeit  $EI$  und Biegespannung  $\sigma_b$  hat. Jedoch nähert sich diese

Reduktion mit zunehmender Breite  $b_U$  einem konstanten Niveau an. Beide Gestaltungskriterien müssen bei der Auslegung eines Gelenkbauteils Berücksichtigung finden.

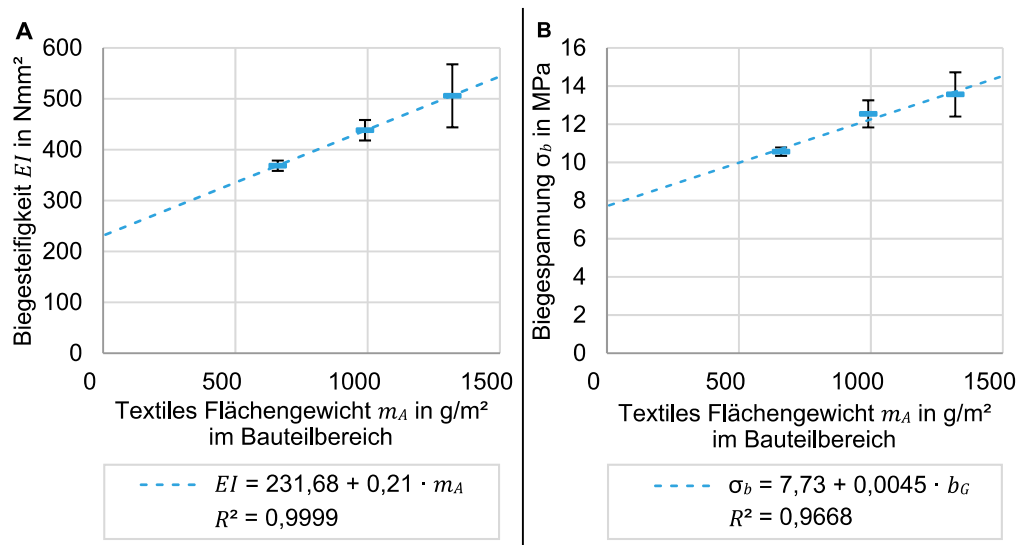
Ein weiterer möglicher Einflussfaktor auf die Biegesteifigkeit  $EI$  und -spannung  $\sigma_b$  im Gelenkbereich ist das Steifigkeitsverhältnis zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich. Zur Überprüfung werden drei verschiedene Laminataufbauten in vergleichenden 2-Punkt-Biegeprüfungen untersucht. Die Laminataufbauten sind schematisch in Abb. 8.9 dargestellt. Der Aufbau des Gelenkbereichs mit einer Schicht ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  ist bei allen Aufbauten identisch. Verändert wird die Anzahl der versteifenden Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$ : Es werden vier, sechs oder acht Schichten eingebracht. In bisherigen Versuchen und Demonstratoren betrug die Anzahl der Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  acht [12, 13, 62, 91]. In den Untersuchungen zum Steifigkeitsverhältnis wird diese Anzahl halbiert (vier Schichten) und zudem ein Zwischenschritt in der Steifigkeit mit sechs Schichten untersucht. Die Gelenkbreite  $b_G$  beträgt bei allen drei Aufbauten 20 mm und entspricht somit der mittleren Gelenkbreite aus den vorangegangenen Untersuchungen. Die Aufbauten haben keinen Übergangsbereich, sondern alle Schichten ET222  $(0/90)^\circ$  schließen direkt an den Gelenkbereich an. So können Wechselwirkungen zwischen dem Faktor  $b_U$  und dem Steifigkeitsverhältnis ausgeschlossen werden. Ihre äußere Geometrie nach dem Pressprozess entspricht folglich der Geometrie der Gelenkbauteil-Prüfkörper zur Untersuchung der Gelenkbreite  $b_G$  (vgl. Abb. 8.2B). Die Gelenkbauteile werden mit der HHZ99-Schicht auf der Druckseite bei Biegebelastung geprüft (vgl. Abb. 8.4).



**Abb. 8.9** Schematische Darstellung der Laminataufbauten der Gelenkbauteil-Prüfkörper (vor dem Pressprozess) für die Untersuchung des Steifigkeitsverhältnisses zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich in der 2-Punkt-Biegeprüfung mit (a) HHZ99, (b) ET222 Faserorientierung  $(0/90)^\circ$ , (c) TPU, (d) ET222 Faserorientierung  $(\pm 45)^\circ$ ; **A** Textiles Flächengewicht im Bauteilbereich  $m_A = 660 \text{ g/m}^2$  (vier Schichten ET222  $(0/90)^\circ$ ), **B** Textiles Flächengewicht im Bauteilbereich  $m_A = 990 \text{ g/m}^2$  (sechs Schichten ET222  $(0/90)^\circ$ ), **C** Textiles Flächengewicht im Bauteilbereich  $m_A = 1320 \text{ g/m}^2$  (acht Schichten ET222  $(0/90)^\circ$ ).

Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung sind in Abb. 8.10 dargestellt. Je höher das textile Flächengewicht im Bauteilbereich, desto größer auch die Streuung der Messwerte. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt durch das Matrixsystem bzw. die unregelmäßigen Anlagerungen in den Kavitäten des Gewebes am Übergang zum Gelenkbereich bedingt wird.

Dieser Effekt wird verstärkt je größer das textile Flächengewicht  $m_A$  im Bauteilbereich und folglich je größer die Anzahl der Prepregschichten ist.



**Abb. 8.10 Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung mit unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnissen zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich durch Erhöhung des textilen Flächengewichtes im Bauteilbereich (Einspannung mit HHZ99 auf der Druckseite) ( $n = 5$ );**  
**A** Biegesteifigkeit  $EI$  abhängig vom textilen Flächengewicht  $m_A$  im Bauteilbereich,  
**B** Biegespannung  $\sigma_b$  abhängig vom textilen Flächengewicht  $m_A$  im Bauteilbereich.

Ungeachtet der Streuung kann ein linearer Zusammenhang mit hohem Bestimmtheitsmaß auf Basis der Messwerte abgeleitet werden. Die Regressionsfunktion ist in Abb. 8.10A dargestellt. Mit zunehmendem textilen Flächengewicht im Bauteilbereich nimmt ebenso die Biegesteifigkeit  $EI$  eines Gelenkbauteils bzw. die resultierenden Biegespannungen  $\sigma_b$  zu. Durch die Verdoppelung des textilen Flächengewichtes von  $m_A = 660 \text{ g/m}^2$  auf  $m_A = 1320 \text{ g/m}^2$  steigt die Biegesteifigkeit  $EI$  um ca. 37,24 %. Die gemessenen max. Biegespannungen  $\sigma_b$  für  $m_A = 660 \text{ g/m}^2$  und  $m_A = 1320 \text{ g/m}^2$  zeigen ebenfalls eine Zunahme in Abhängigkeit vom textilen Flächengewicht  $m_A$ , allerdings in einem geringeren Ausmaß als es für die Biegesteifigkeit  $EI$  zu beobachten ist. Sie beträgt ca. 28,35 %.

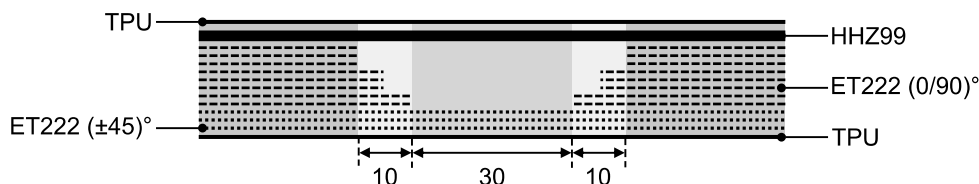
Auf Basis dieser Versuche ist nachweisbar, dass das Verhältnis der Steifigkeit zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich einen Einfluss auf die resultierende Steifigkeit  $EI$  im Gelenkbauteil hat. Entsprechend muss die Anzahl der Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  im Bauteilbereich ebenfalls in die analytische Betrachtung der Einflussparameter für ein Vorhersagemodell mit einbezogen werden. Eine Einzelbetrachtung der Biegesteifigkeit  $EI$  im Gelenk- und Bauteilbereich wie sie in Kapitel 6.2 durchgeführt wurde ist folglich nur ausreichend für die Auslegung der Steifigkeit  $EI$  des Bauteilbereiches, jedoch nicht für die Steifigkeit  $EI$  des Gelenkbereichs bzw. des Gelenkbauteils.

Abschließend gilt es zu ermitteln, ob der Verformungswinkel unter zyklischer Belastung einen Einfluss auf die Restfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  des Gelenkbauteils besitzt und in der analytischen Betrachtung der Einflussparameter Berücksichtigung finden muss. Dazu werden zyklische Biegeprüfungen (vgl. Kapitel 7) mit vier verschiedenen maximalen Biegewinkeln ( $\alpha_{max(I)} = 45^\circ$ ,  $\alpha_{max(II)} = 90^\circ$ ,  $\alpha_{max(III)} = 135^\circ$ ,  $\alpha_{max(IV)} = 174^\circ$ ) durchgeführt. Die weiteren Einstellungen des Prüfstands sind in Tab. 8.1 aufgeführt.

**Tab. 8.1** Einstellung des zyklischen Biegeprüfstands für die Prüfung des Biegewinkels.

Winkelgeschwindigkeit	Min. Winkel	Messintervall	Lastspiele	Haltezeit
in rad/s	in $^\circ$	in $^\circ$	in -	in ms
0,62	0	2	5.000	3.250

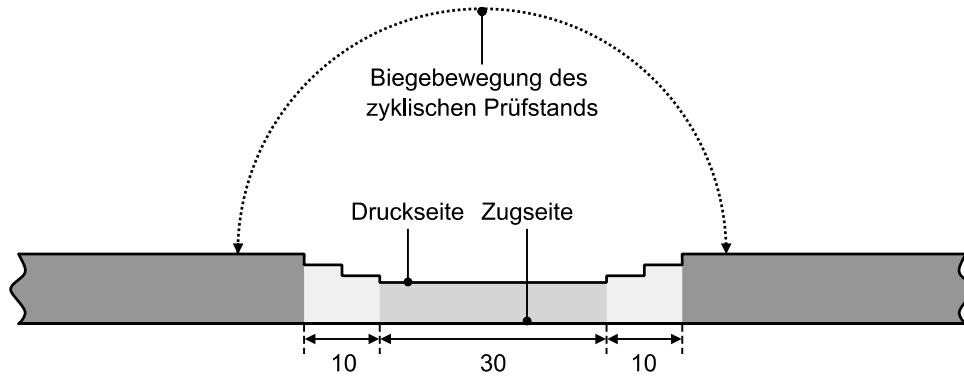
Der Laminataufbau des zu prüfenden Gelenkbauteils basiert auf Voruntersuchungen außerhalb dieser Arbeit [13, 76] und ist als schematische Querschnittszeichnung in Abb. 8.11 dargestellt. Der Gelenkbereich ist mit drei Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  verstärkt. Die Breite des Gelenkbereiches beträgt  $b_G = 30$  mm. Im Bauteilbereich sind acht versteifende Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  eingebracht. Diese Schichten enden stufenweise im Übergangsbereich, dessen Breite  $b_U = 10$  mm beträgt.



**Abb. 8.11** Schematische Darstellung des Laminataufbaus der Gelenkbauteil-Prüfkörper (vor dem Pressprozess) für die Untersuchung des Einflusses des Biegewinkels auf die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  in der zyklischen Biegeprüfung.

Die unteren beiden Schichten grenzen direkt an den Gelenkbereich, die darauf liegenden drei Schichten enden in der Mitte des Übergangsbereichs ( $b_U/2$ ) und die oberen drei Schichten schließen mit dem Bauteilbereich ab. Durch die Abstufung im Übergangsbereich entspricht die äußere Geometrie prinzipiell der Geometrie der Gelenkbauteil-Prüfkörper für die Untersuchung der Übergangsbreite  $b_U$ , die in Abb. 8.6 dargestellt sind.

In der Biegeprüfung werden die Gelenkbauteile mit der HHZ99-Schicht bzw. der geprägten Seite oben liegend eingespannt. Die HHZ99-Schicht liegt somit auf der Druckseite bei der Biegebelastung. Die Einspannung des Prüfkörpers in Relation zur eingebrachten zyklischen Biegebelastung ist in Abb. 8.12 dargestellt.



**Abb. 8.12** Schematische Darstellung der Einspannung (0°-Lage) des Gelenkbauteil-Prüfkörpers im zyklischen Biegeprüfstand mit der HHZ99-Schicht auf der Druckseite bei Biegebelastung (Außengeometrie des Gelenkbauteil-Prüfkörpers nach dem Verpressen des Laminataufbaus aus Abb. 8.11).

Alle Prüfkörper zeigen keinen Verlust der Biegespannung  $\sigma_b > 70\%$  und erfüllen somit nicht das in Kapitel 7.2 festgelegte Bruchkriterium. Die ermittelten Biegespannungen  $\sigma_b$  und -steifigkeiten  $EI$  sind in Tab. 8.3 dargestellt. Die initiale Biegesteifigkeit  $EI_0$  der vier Prüfkörpergruppen ist, trotz identischem Laminataufbau, unterschiedlich. Dieses Ergebnis wird bedingt durch die unterschiedliche Dicke  $h$  der Prüfkörper: Sie beläuft sich im Mittel auf  $h_{(I) 45^\circ} = 1,35$  mm,  $h_{(II) 90^\circ} = 1,31$  mm,  $h_{(III) 135^\circ} = 1,45$  mm und  $h_{(III) 174^\circ} = 1,36$  mm und korreliert folglich mit der unterschiedlichen Höhe der Steifigkeiten  $EI_0$ .

Ursächlich ist das bereits beschriebene nicht kontrollierbare Fließen des Epoxidharzes aus den Schichten des Bauteilbereichs in den Gelenkbereich während des Pressprozesses. Im Mittel beträgt  $EI_0$  790,95 Nmm<sup>2</sup>. Die Betriebsfestigkeit wird früher erreicht je kleiner der Biegewinkel  $\alpha$  (vgl. Tab. 8.2). Für einen Biegewinkel von  $\alpha = 45^\circ$  wird die Betriebsfestigkeit bereits nach  $N_D = 45 \pm 23$  Lastspielen erreicht und bei  $\alpha = 174^\circ$  nach  $N_D = 423 \pm 263$  Lastspielen.

**Tab. 8.2** Lastspiel  $N_D$  in Abhängigkeit vom Biegewinkel  $\alpha$  ( $n = 5$ ).

		I	II	III	III
Max. Winkel	in °	45	90	135	174
$N_D$	in -	$45 \pm 23$	$39 \pm 10$	$108 \pm 14$	$423 \pm 263$

Die prozentuale Betriebsbiegesteifigkeit  $EI_D/EI_0$  ist kleiner und die Biegespannungen  $\sigma_{b0}$  und  $\sigma_{bD}$  sind höher je größer der Biegewinkel  $\alpha$ . Es ist anzunehmen, dass durch einen größeren Verformungswinkel  $\alpha$  die Kraft  $F$ , die bei der Biegung eingebracht werden muss, größer und folglich die Beanspruchung des Materials höher ist. Durch die höhere Beanspruchung wird das Material stärker geschädigt, und die Steifigkeit wird in höherem Maß reduziert.

**Tab. 8.3 Biegespannungen und -steifigkeiten aus zyklischer Biegeprüfung abhängig vom maximalen Biegewinkel  $\alpha$  und Änderung zwischen initialen mechanischen Kennwerten und mechanischen Kennwerten bei Betriebsfestigkeit ( $n = 5$ ).**

	Max. Winkel in °	$EI_0$ in Nmm <sup>2</sup>	$EI_D$ in Nmm <sup>2</sup>	$EI_D/EI_0$ in %	$\sigma_{b0}$ in MPa	$\sigma_{bD}$ in MPa	$\sigma_{bD}/\sigma_{b0}$ in %
<b>I</b>	45	769,26 ± 15,47	746,23 ± 19,07	97,01	1,97 ± 0,08	1,79 ± 0,06	90,80
<b>II</b>	90	656,39 ± 13,80	605,64 ± 9,68	92,27	3,14 ± 0,12	2,82 ± 0,17	89,95
<b>III</b>	135	923,13 ± 13,14	731,57 ± 26,44	79,25	5,13 ± 0,05	4,52 ± 0,06	88,09
<b>IIII</b>	174	814,99 ± 18,73	556,47 ± 26,44	68,28	7,24 ± 0,15	6,21 ± 0,26	85,86

Zur Analyse der Auswirkungen auf die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  werden die Gelenkbauteil-Prüfkörper im Anschluss an die zyklische Biegeprüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 14129:1998 [23] (vgl. Kapitel 4.3.4) geprüft. Die Ergebnisse sind in Tab. 8.4 dargestellt. Neben der absoluten Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  ist die prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  angegeben. Dabei wird die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  auf die theoretisch berechnete Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  des Laminats im Gelenkbereich (vgl. Kapitel 6.1) bezogen.

**Tab. 8.4 Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  und prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  in Abhängigkeit vom Biegewinkel  $\alpha$  ( $n = 5$ ).**

		<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IIII</b>
Max. Winkel	in °	45	90	135	174
$\sigma_{ZR}$	in MPa	63,83 ± 2,68	56,90 ± 3,31	60,71 ± 1,27	56,99 ± 8,62
$\sigma_{ZR}/\sigma_Z$	in %	96,50 ± 4,05	86,02 ± 5,00	91,78 ± 1,92	93,67 ± 0,77

Die Analyse der Werte selbst gibt keinen Aufschluss über die mögliche Änderung der Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  in Abhängigkeit vom Biegewinkel  $\alpha$ . Zur Kontrolle, ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Messwerten der Prüfkörper (I) bis (IIII) besteht, wird eine ANOVA durchgeführt. Sie ergibt einen p-Wert = 0,218, so dass die Nullhypothese mit einem 5 %-tigen Risiko angenommen werden kann. Demzufolge besteht kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Restzugfestigkeiten  $\sigma_{ZR}$  der Prüfkörper.

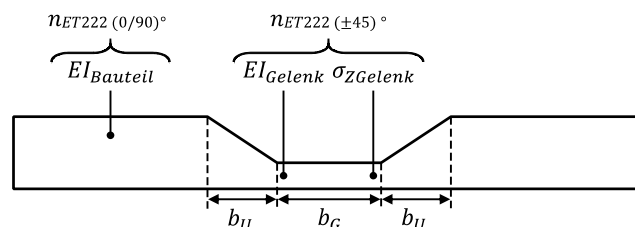
Der Biegewinkel  $\alpha$  hat folglich nur einen Einfluss auf die Biegespannung  $\sigma_b$  bzw. -steifigkeit  $EI$ , jedoch nicht auf die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach einer bestimmten Lastspielzahl  $N$ . Es ist anzunehmen, dass eine größere Biegebewegung eine stärkere Schädigung des spröden Epoxidharzes in den ET222-Schichten des Gelenkbereichs zur Folge hat. Dementsprechend nimmt die Steifigkeit  $EI$  durch einen größeren Biegewinkel  $\alpha$  in höherem Maß ab. Allerdings sind die Fasern in den ET222-Schichten lasttragend und im Hinblick auf die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  relevant. Auf Basis der in Tab. 8.3 und Tab. 8.4 dargestellten Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Fasern im Gegensatz zum Epoxidharz einer vergleichsweise geringen Schädigung unterliegen und sich somit zwar die Steifigkeit

$EI$  reduziert, aber die Restzugfestigkeitseigenschaften  $\sigma_{ZR}$  nicht signifikant verändert werden. Der Biegewinkel  $\alpha$  wird daher für die Analyse der Auslegungskriterien nicht weiter berücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die HHZ99-Schicht stets auf der druckbelasteten Seite des Gelenkbauteils eingebracht werden muss, und sowohl die Biegesteifigkeit  $EI$  als auch die -spannungen  $\sigma_b$  von der Gelenkbreite  $b_G$  und der Übergangsbreite  $b_U$  determiniert werden. Auch das Steifigkeitsverhältnis zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich hat einen Einfluss auf die Biegeeigenschaften. Der Biegewinkel  $\alpha$  hat dagegen keinen Einfluss auf die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$ .

## 8.2 Analyse der Auslegungskriterien eines Gelenkbauteils

Vorbereitend für die Ableitung eines Vorhersage- bzw. Auslegungsmodells müssen die herausgearbeiteten Einflussfaktoren in einer Versuchsreihe unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren anhand von Gelenkbauteil-Prüfkörpern untersucht werden. Es ist zu unterscheiden zwischen den Einflussfaktoren bezüglich der Biegeeigenschaften des Gelenkbauteils und derer, die die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach einer bestimmten Lastspielzahl  $N$  einstellen. Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 8.1 müssen sowohl die Gelenkbreite  $b_G$  und die Übergangsbreite  $b_U$  als auch die Biegesteifigkeiten  $EI$  vom Gelenk- und Bauteilbereich in die Analyse einbezogen werden. Die Parameter sind in Abb. 8.13 schematisch anhand eines Gelenkbauteil-Querschnitts dargestellt.



**Abb. 8.13** Schematische Darstellung der untersuchten Einflussfaktoren: Anzahl der Einzelschichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222 (0/90)^\circ}$ , Anzahl der Einzelschichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$ , Biegesteifigkeit im Bauteilbereich  $EI_{Bauteil}$ , Biegesteifigkeit im Gelenkbereich  $EI_{Gelenk}$ , Zugfestigkeit im Gelenkbereich  $\sigma_{ZGelenk}$ , Breite des Übergangsbereichs  $b_U$ , Breite des Gelenkbereichs  $b_G$ .

Aus Kapitel 6.1 ist bekannt, dass die Festigkeit des Gelenkbereichs über die Anzahl der Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$  eingestellt wird. Über die Anzahl  $n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$  wird gleichermaßen die Biegesteifigkeit  $EI$  vom Gelenk- und Bauteilbereich verändert, wobei ebenso die Anzahl der ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222 (0/90)^\circ}$  beachtet werden muss (vgl. Kapitel 6.2). In der Analyse der Auslegungskriterien von FVK-Gelenkbauteilen bestehend aus dem definierten Hybridverbund kann also vereinfacht von vier Auslegungskriterien ausgegangen werden:

- (1) Gelenkbreite  $b_G$
- (2) Übergangsbreite  $b_U$
- (3) Anzahl der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$
- (4) Anzahl der Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222 (0/90)^\circ}$

Für diese vier Einflusskriterien wird mittels Design of Experiments (DoE) unter der Verwendung des Programms Minitab 19 (Minitab GmbH) ein teilfaktorieller Versuchsplan aufgestellt. Durch die teilfaktorielle, statistische Versuchsplanung ist es möglich gezielt Versuchseinstellungen auszusparen. So wird der experimentelle Aufwand weitestgehend reduziert und die Effizienz der Faktoranalyse gesteigert. Bei vier Faktoren, wie hier vorliegend, bildet ein Versuchsplan mit acht Versuchsdurchläufen die untere Grenze der statistischen Auswertung. Dabei werden die Dreifachwechselwirkungen als vernachlässigbar klein erachtet und ausgespart. Die Zweifachwechselwirkungen werden dagegen mit einer Unsicherheit in der Zuordnung, da hier die Wechselwirkungen der Hauptfaktoren untrennbar vermischt sind, berücksichtigt. Trotzdem gilt dieses Schema für die Untersuchung von vier Faktoren als ausreichend und wird in der Praxis erfolgreich eingesetzt [102].

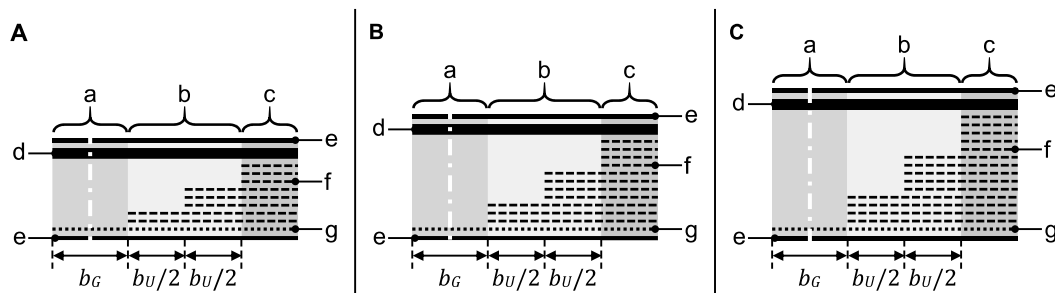
Für den Versuchsplan werden die Ober- und Untergrenzen der Breite vom Gelenk- und Übergangsbereich ( $b_G$  und  $b_U$ ) analog zu den durchgeführten 2-Punkt-Biegeprüfungen auf 10 mm bzw. 30 mm festgelegt. Die Anzahl der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$  im Gelenkbereich wird, basierend auf bisherigen Ergebnissen [12, 13, 62, 76, 91, 94], auf ein bis drei Schichten und die Anzahl der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222 (0/90)^\circ}$  im Bauteilbereich auf acht bis vierzehn Schichten festgelegt. Der Versuchsplan mit den zwei Mittelpunktprüfungen (9) und (10) ist in Tab. 8.5 dargestellt.

**Tab. 8.5 Versuchsplan zur Untersuchung der Auslegungskriterien von FVK-Gelenkbauteilen.**

Nummer des Aufbaus	$b_G$	$b_U$	$n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$	$n_{ET222 (0/90)^\circ}$	Abstufung im Übergangsbereich
	in mm	in mm	in Schichtzahl	in Schichtzahl	in Schichtzahl
(1)	10	30	3	8	2/3/3
(2)	10	10	1	8	2/3/3
(3)	10	30	1	14	4/5/5
(4)	30	10	1	14	4/5/5
(5)	10	10	3	14	4/5/5
(6)	30	30	1	8	2/3/3
(7)	30	30	3	14	4/5/5
(8)	30	10	3	8	2/3/3
(9)	20	20	2	11	3/4/4
(10)	20	20	2	11	3/4/4



Die Schrittweite der Abstufung im Übergangsbereich beträgt  $b_U/2$ . Die Abstufung der ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  ist in Abb. 8.14 für 8, 11 und 14 Schichten dargestellt. Es ergibt sich für  $n_{ET222 (0/90)^\circ} = 8$  eine Abstufung zu 2/3/3 Schichten, für  $n_{ET222 (0/90)^\circ} = 11$  beträgt die Abstufung 3/4/4 Schichten und für  $n_{ET222 (0/90)^\circ} = 14$  sind es 4/5/5 Schichten. Somit beinhalten die mittlere und obere Abstufung in allen Aufbauten eine zusätzliche Schicht im Vergleich zur unteren Abstufung. Es wird angenommen, dass durch diese Verteilung der Schichten die Beanspruchung des Materials im Übergang zwischen dem Gelenk- und Übergangs- bzw. Bauteilbereich möglichst gering gehalten wird.



**Abb. 8.14** Schematische Querschnittsdarstellung der Abstufung der ET222 Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222 (0/90)^\circ}$  im Übergangsbereich der Gelenkbauteil-Prüfkörper mit (a) Gelenkbereich, (b) Übergangsbereich, (c) Bauteilbereich, (d) HHZ99, (e) TPU, (f) ET222  $(0/90)^\circ$ , (g) ET222  $(\pm 45)^\circ$ ;  
**A**  $n_{ET222 (0/90)^\circ} = 8$ , **B**  $n_{ET222 (0/90)^\circ} = 11$ , **C**  $n_{ET222 (0/90)^\circ} = 14$ .

Durch die einheitliche Verteilung der Schichten in allen Prüfkörperaufbauten soll der Einfluss auf die gemessenen mechanischen Eigenschaften und somit die Verfälschung der auftretenden Effekte durch die festgelegten vier Einflussfaktoren  $b_G$ ,  $b_U$ ,  $n_{ET222 (0/90)^\circ}$  und  $n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$  ausgeschlossen werden.

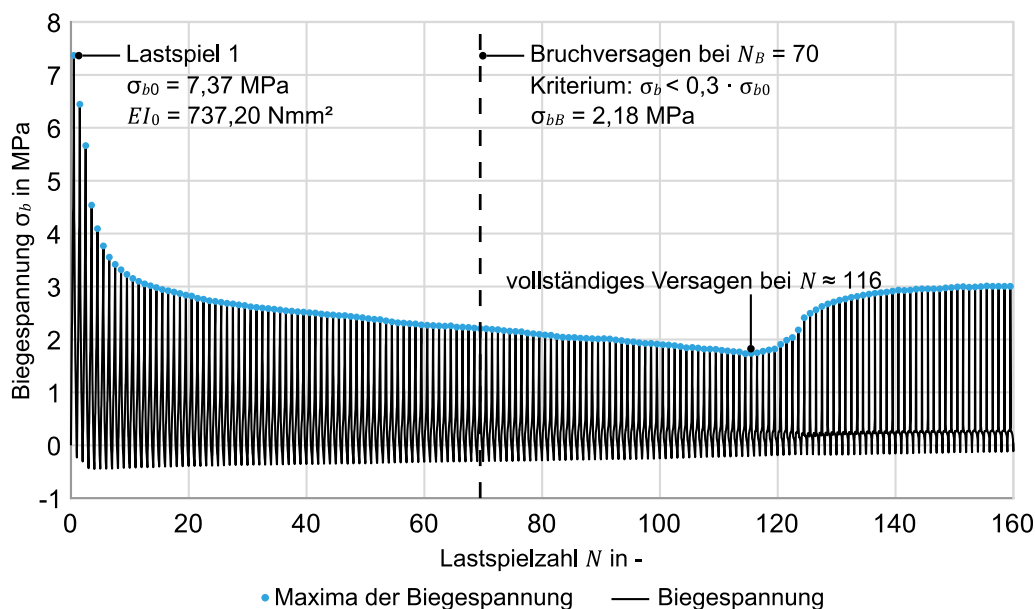
Wie in Kapitel 7.1 erläutert, wird die Einstellung der Haltezeit einmalig anhand von FVK-Gelenkbauteilen mit  $n_{ET222 (0/90)^\circ} = 8$  und  $n_{ET222 (\pm 45)^\circ} = 1$  sowie einer Gelenkbreite  $b_G = 10$  mm und einer Übergangsbreite  $b_U = 10$  mm durchgeführt. Die Haltezeit des Prüfstands beträgt dementsprechend 3250 ms. Die Versuchseinstellungen sind in Tab. 8.6 aufgeführt.

**Tab. 8.6** Einstellungen des zyklischen Biegeprüfstands zur Untersuchung der Auslegungskriterien von FVK-Gelenkbauteilen.

Winkelgeschwindigkeit	Min. Winkel	Max. Winkel	Messintervall	Lastspiele	Haltezeit
in rad/s	in $^\circ$	in $^\circ$	in $^\circ$	in -	in ms
0,62	0	174	2	5.000	3.250

In der mechanischen Untersuchung der zehn Prüfkörperaufbauten tritt zum Teil das für die zyklische Biegeprüfung festgelegte Bruchkriterium, also eine Reduktion der Biegespannung um mehr als 70 % auf. Alle fünf Prüfkörper der Aufbauten (1), (5) und (7) zeigen

Bruchversagen nach  $N_{B(1)} = 57 \pm 18$ ,  $N_{B(5)} = 469 \pm 103$  bzw.  $N_{B(7)} = 722 \pm 279$ . Exemplarisch dafür ist der Biegespannungsverlauf über die Lastspielzahl  $N$  eines Prüfkörpers mit dem Aufbau (1) in Abb. 8.15 gezeigt.



**Abb. 8.15** Ergebniskurve eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit Aufbau (1) analog zu Tab. 8.5 mit Bruchversagen nach  $N_B = 70$  und vollständigem Versagen nach ca.  $N \approx 116$ .

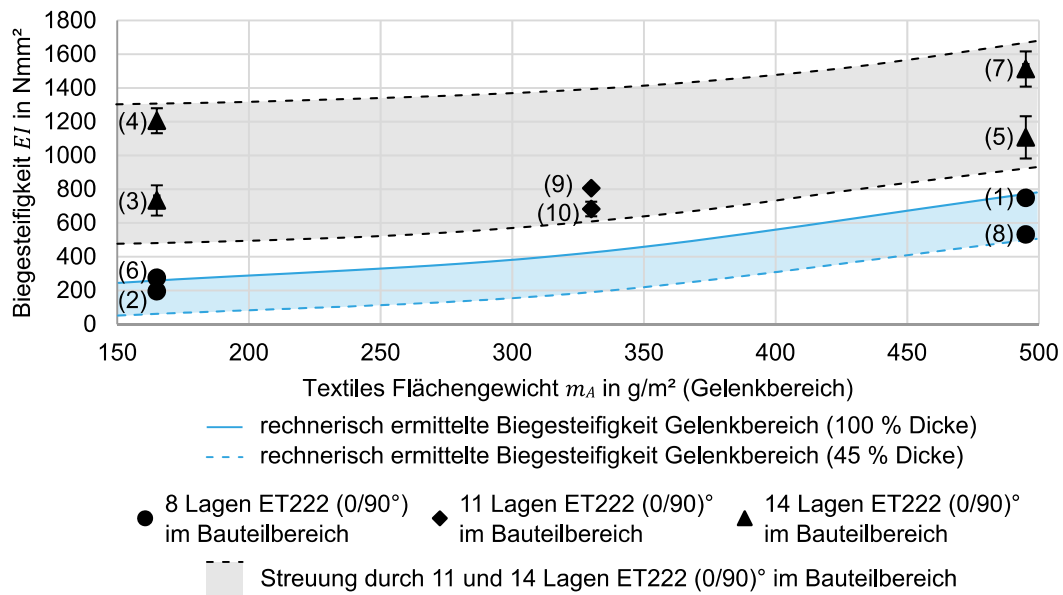
Die initiale Biegesteifigkeit  $EI_0$  beträgt  $737,20 \text{ Nmm}^2$  und die initiale maximale Biegespannung ist  $\sigma_{b0} = 7,37 \text{ MPa}$ . Das Bruchversagen tritt nach  $N_B = 70$  Lastspielen auf. Die Bruchbiegespannung beträgt  $\sigma_{bB} = 2,18 \text{ MPa}$ . Der reale Bruch des Prüfkörpers findet  $N = 46$  Lastspiele nach dem Auftreten des Bruchkriteriums ( $\sigma_b < 0,3 \cdot \sigma_{b0}$ ) statt. Da sich nach dem Bruch des Prüfkörpers im Gelenkbereich kein Biegeradius einstellt, treffen dort die beiden Enden des Gelenkbauteils spitz zulaufend aufeinander, so dass der Bruch durch einen Anstieg der gemessenen Kraft  $F$  bzw. der Biegespannung  $\sigma_b$  angezeigt wird.

Die initialen Biegeeigenschaften in Lastspiel  $N = 1$  sind für alle Gelenkbauteil-Prüfkörper trotz Bruchversagen bestimmbar, so dass diese Werte für alle Prüfkörperaufbauten in die Analyse der Auslegungskriterien von FVK-Gelenkbauteilen eingehen. Die initialen Biegeeigenschaften der zehn Aufbauten sind in Tab. 8.7 aufgeführt.

**Tab. 8.7** Initiale Biegeeigenschaften  $\sigma_{b0}$  und  $EI$  der Prüfkörper (1) bis (10) (vgl. Tab. 8.5) zur Untersuchung der Auslegungskriterien ( $n = 5$ ).

Nummer des Aufbaus	$\sigma_{b0}$	$EI_0$
	in MPa	in Nmm <sup>2</sup>
(1)	7,45 ± 0,23	748,82 ± 23,50
(2)	2,99 ± 0,40	195,54 ± 21,64
(3)	7,33 ± 1,02	733,52 ± 89,57
(4)	10,71 ± 0,57	1205,90 ± 74,09
(5)	9,52 ± 0,48	1107,13 ± 125,23
(6)	3,08 ± 0,01	275,32 ± 30,09
(7)	11,35 ± 0,67	1512,37 ± 104,35
(8)	5,03 ± 0,18	532,25 ± 27,84
(9)	6,86 ± 0,27	806,11 ± 7,96
(10)	5,76 ± 0,34	682,75 ± 43,16

Die initialen Biegesteifigkeiten  $EI_0$  aus der zyklischen Biegeprüfung zeigen zum Teil eine hohe Abweichung zu den in Kapitel 6.2 berechneten Biegesteifigkeiten  $EI$ . In Abb. 8.16 sind die Biegesteifigkeiten  $EI_0$  der mechanischen Biegeprüfung den rechnerisch ermittelten Biegesteifigkeiten  $EI$  gegenübergestellt.



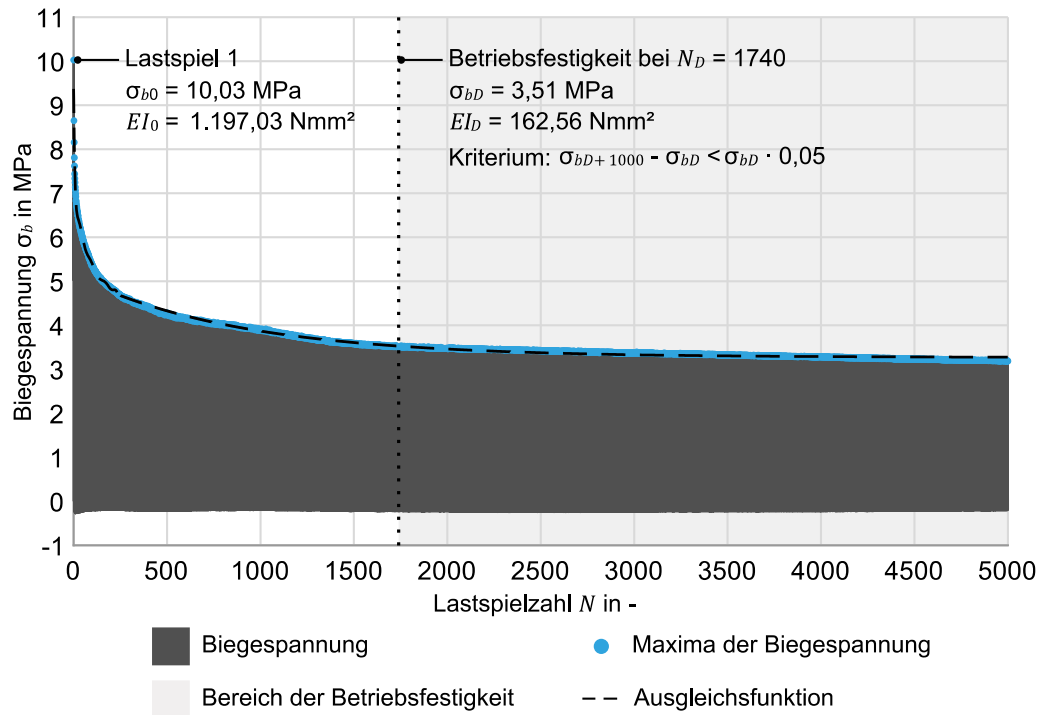
**Abb. 8.16** Gegenüberstellung rechnerisch ermittelte initiale Biegesteifigkeit  $EI$  ohne bzw. mit Komprimierung der TPU- und HHZ99-Schicht (100 % bzw. 45 % Dicke) und initiale Biegesteifigkeit  $EI_0$  resultierend aus der zyklischen Biegeprüfung ( $n = 5$ ) in Abhängigkeit vom textilen Flächengewicht  $m_A$  im Gelenkbereich und der Anzahl ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von (0/90)°  $n_{ET222(0/90)^\circ}$  (Beschriftung der Prüfkörper analog zu Tab. 8.5).

Erkennbar ist, dass die Biegesteifigkeiten ausschließlich für die Prüfkörper mit 11 bzw. 14 Schichten ET222 (0/90)° in größerem Maß von den berechneten Werten abweichen. Die Biegesteifigkeiten  $EI_0$  der Prüfkörperaufbauten (1), (2), (6) und (8) liegen in dem festgelegten Streuungsbereich für die berechneten Biegesteifigkeiten  $EI$  entsprechend Kapitel 6.2 (vgl. unterer blauer Streuungsbereich in Abb. 8.16). Der Streuungsbereich der Biegesteifigkeiten  $EI_0$  für die Aufbauten (3), (4), (5), (7), (9) und (10) liegt deutlich darüber (vgl. oberer grauer Streuungsbereich in Abb. 8.16). Die Abweichung ist höher je größer die Schichtanzahl  $n_{ET222 (0/90)^\circ}$  ist.

Bereits die Untersuchungen zum Einfluss des Biegewinkels  $\alpha$  (vgl. Tab. 8.3 und Tab. 8.4) haben gezeigt, dass die Biegespannungen  $\sigma_b$  und -steifigkeiten  $EI$  hauptsächlich durch das entropieelastische Epoxidharz bestimmt werden. Es ist ebenfalls bekannt, dass das Epoxidharz im Pressprozess unter Druck und Wärme fließt bis es vollständig vernetzt ist und erstarrt. Wahrscheinlich ist, dass durch eine Erhöhung der Schichtanzahl ET222 mit einer Faserorientierung von (0/90)° ein stärkerer Fluss des Epoxidharzes stattfindet, der auch den Gelenkbereich betrifft. Je breiter dieser und je höher die Anzahl der Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von (0/90)°  $n_{ET222 (0/90)^\circ}$ , desto mehr Epoxidharz kann sich dort sammeln und, desto höher ist die Abweichung der resultierenden Biegesteifigkeit  $EI_0$  in der zyklischen Biegeprüfung.

Einzelne Prüfkörper der Aufbauten (2), (3) und (4) erfüllen ebenfalls das Versagenskriterium nach Formel (7.2). Sie werden als Ausreißer für die Auswertung der Betriebsfestigkeit nicht weiter berücksichtigt.

In Abb. 8.17 ist exemplarisch ein Kurvenverlauf für einen Gelenkbauteil-Prüfkörper mit dem Aufbau (4) dargestellt. Die einzelnen Lastspiele sind nicht an der Biegespannungskurve ablesbar, da sie direkt aneinandergrenzen und einen einheitlich gefärbten Bereich unter den Biegespannungsmaxima bzw. deren Ausgleichskurve bilden. Die Biegespannungsmaxima sind ebenfalls nicht einzeln ablesbar. In den ersten 500 Lastspielen nimmt die Biegespannung stark ab. Vermutlich wird innerhalb dieser Lastspiele ein Großteil des Epoxidharzes geschädigt. Über die nachfolgenden 1240 Lastspiele nimmt die gemessene maximale Biegespannung  $\sigma_b$  weiter ab und erreicht schließlich bei  $N_D = 1740$  das Niveau der Betriebsfestigkeit, d. h. einen annähernd konstanten Wert für die Biegespannung  $\sigma_b$  mit keiner Änderung größer 5 % innerhalb der nachfolgenden 1.000 Lastspiele. Die prozentuale Reststeifigkeit  $EI_D/EI_0$  beträgt 13,58 % und die prozentuale Restbiegespannung  $\sigma_{bD}/\sigma_{b0}$  ist 35,05 %.



**Abb. 8.17** Exemplarische Ergebniskurve eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit Aufbau (4) analog zu Tab. 8.5 mit Erreichen der Betriebsfestigkeit nach  $N_D = 1740$  Lastspielen.

Die Betriebsfestigkeitseigenschaften aller Prüfaufbauten, die neben Aufbau (4) das Kriterium der Betriebsfestigkeit erfüllen, sind in Tab. 8.8 dargestellt. In Abb. 8.18 ist darüber hinaus eine Übersicht über alle Prüfkörper, ihren Aufbau entsprechend dem Versuchsplan (vgl. Tab. 8.5) und der Zuordnung zu den Kriterien Betriebsfestigkeit und Bruchversagen gezeigt.

**Tab. 8.8** Betriebsfestigkeitseigenschaften der Prüfkörper (1) bis (10) (vgl. Tab. 8.5) zur Untersuchung der Auslegungskriterien ( $n = 5$ ).

Nummer des Aufbaus	$N_D$ in -	$\sigma_{bD}$ in MPa	$\sigma_{bD}/\sigma_{b0}$ in %	$EI_D$ in Nmm <sup>2</sup>	$EI_D/EI_0$ in %
(1)		Bruchversagenskriterium erfüllt bei $N_B = 57 \pm 18$			
(2)	$1412 \pm 336$	$1,09 \pm 0,08$	36,52	$94,13 \pm 20,97$	48,14
(3)	$1488 \pm 552$	$2,99 \pm 0,31$	40,77	$305,21 \pm 53,01$	41,61
(4)	$1541 \pm 282$	$3,70 \pm 0,27$	34,56	$194,36 \pm 44,98$	16,12
(5)		Bruchversagenskriterium erfüllt bei $N_B = 469 \pm 103$			
(6)	$233 \pm 4$	$2,29 \pm 0,01$	74,23	$127,75 \pm 19,76$	46,40
(7)		Bruchversagenskriterium erfüllt bei $N_B = 722 \pm 279$			
(8)	$113 \pm 8$	$4,27 \pm 0,15$	84,94	$370,77 \pm 12,50$	69,66
(9)	$227 \pm 3$	$5,61 \pm 0,28$	81,89	$527,29 \pm 1,33$	65,41
(10)		Betriebsfestigkeits- und Bruchversagenskriterium nicht erfüllt			

Prüfkörperaufbau (10) erfüllt weder das Kriterium eines Bruches noch das der Betriebsfestigkeit innerhalb der geprüften 5.000 Lastspiele und wird daher in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Der statistische Versuchsplan berücksichtigt entsprechend noch immer die Mindestanzahl von acht Gleichungssystemen für vier Hauptfaktoren, aber nur eine Mittelpunktprüfung. Mithin kann gesagt werden, dass je steifer das Gelenk ist, desto höher ist auch die resultierende max. Biegespannung  $\sigma_{bD}$ . Die Betriebsfestigkeit wird abhängig von der Gelenkbreite  $b_G$  und der Schichtanzahl  $n_{ET222(0/90)^\circ}$  bzw.  $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$  früher erreicht je kleiner die Gesamtanzahl der Schichten ( $n_{ET222(0/90)^\circ} + n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ ) bzw. je größer die Gelenkbreite  $b_G$  ist. Die in Tab. 8.8 dargestellten Werte der Betriebsfestigkeit zeigen, dass sowohl die messbaren Biegespannungen  $\sigma_{bD}$  als auch die Biegesteifigkeiten  $EI_D$  durch das wechselnde Lastspiel reduziert werden. Die prozentual verbleibende Biegespannung  $\sigma_{bD}/\sigma_{b0}$  bzw. die prozentuale Betriebsbiegesteifigkeit  $EI_D/EI_0$  sind in Tab. 8.8 aufgeführt. Die beiden Werte korrelieren miteinander.

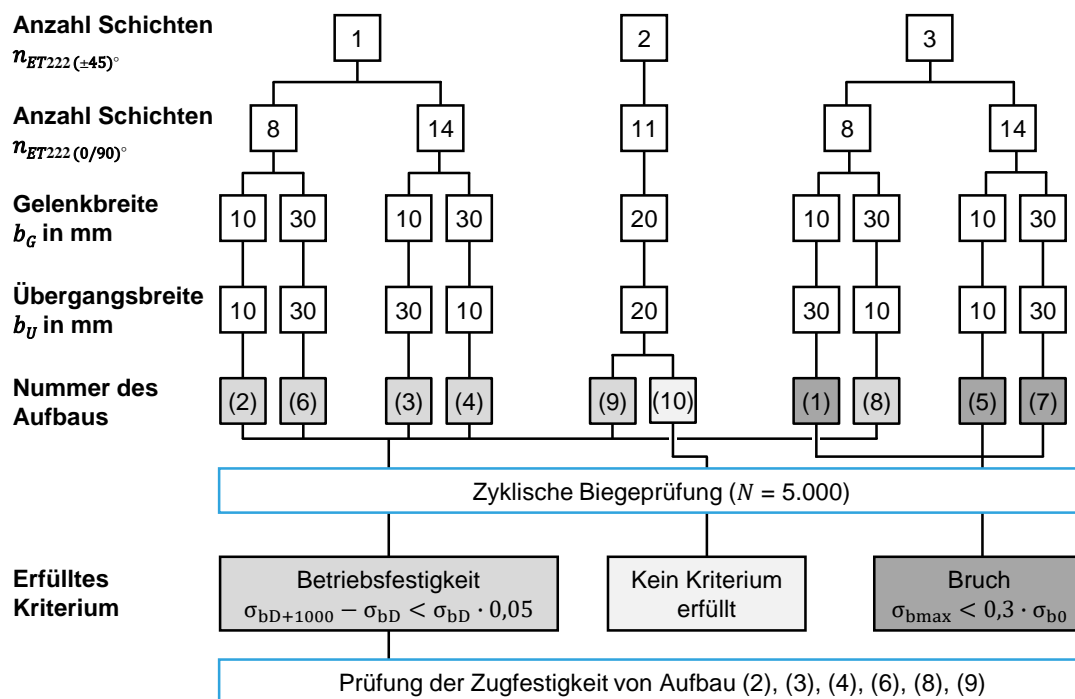


Abb. 8.18 Übersicht des Aufbaus der Prüfkörper (1) bis (10) und Zuordnung zu den erfüllten Kriterien.

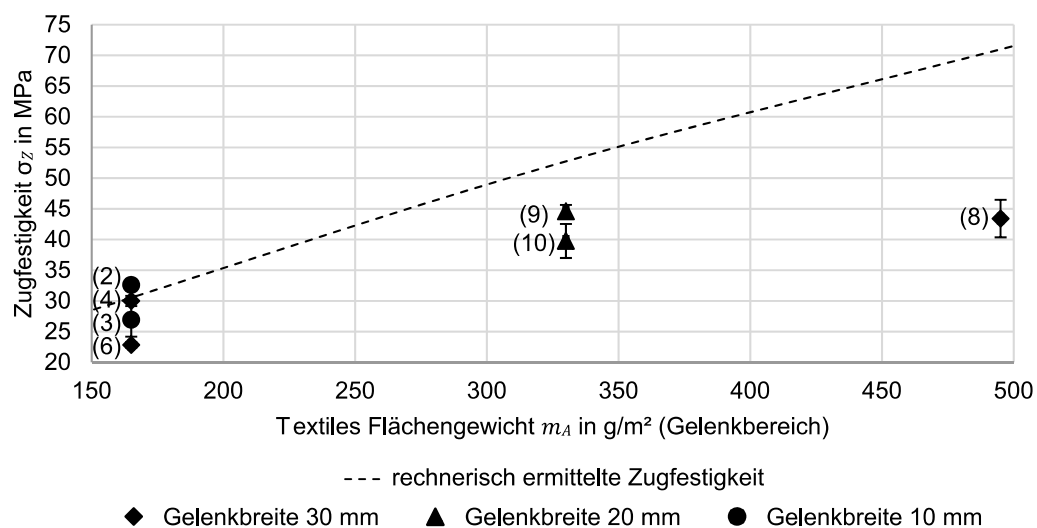
Die Prüfung der Gelenkbauteil-Prüfkörper, die das Kriterium der Betriebsfestigkeit erfüllen (vgl. Tab. 8.8 und Abb. 8.18), nach DIN EN ISO 14129:1998 [23] (vgl. Kapitel 4.3.4) ergibt die in Tab. 8.9 dargestellten Restzugfestigkeiten  $\sigma_{ZR}$ .

**Tab. 8.9 Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  und prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  der Prüfkörperaufbauten (vgl. Tab. 8.5) mit Betriebsfestigkeit (vgl. Tab. 8.8) ( $n = 3$ ).**

Nummer des Aufbaus	(2)	(3)	(4)	(6)	(8)	(9)
$\sigma_{ZR}$ in MPa	$32,61 \pm 0,91$	$26,93 \pm 2,75$	$29,99 \pm 0,84$	$22,83 \pm 0,45$	$43,41 \pm 4,03$	$44,61 \pm 2,77$
$\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ in %	107,47	88,77	98,86	75,25	61,22	84,78

Die in Tab. 8.9 aufgeführte Größe  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  entspricht der prozentualen Restfestigkeit gegenüber der berechneten Kenngröße entsprechend Kapitel 6.1. Prüfkörperaufbau (2) zeigt eine Zunahme in der Zugfestigkeit gegenüber den berechneten Werten. Unter Berücksichtigung der Streuung der Messwerte beträgt die Abweichung zum rechnerisch ermittelten Zugfestigkeitswert  $\sigma_Z$  für einen Gelenkaufbau mit  $n_{ET222}(\pm 45)^\circ = 1$  lediglich 1,36 MPa. Ähnlich wie bei Aufbau (4) scheint lediglich ein geringer bzw. kein Festigkeitsverlust vorhanden ist.

Die Verteilung der Messwerte abhängig vom textilen Flächengewicht  $m_A$  und der Gelenkbreite  $b_G$  gegenüber der berechneten initialen Zugfestigkeit der FVK-Gelenkbauteile ist in Abb. 8.19 dargestellt. Die Materialschädigung im Gelenkbereich ist größer je größer die Anzahl der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222}(\pm 45)^\circ$ . Beispielsweise hat Aufbau (4) mit der geringsten prozentualen Betriebssteifigkeit von  $E_{ID}/E_{I0} = 34,56\%$  noch eine prozentuale Restzugfestigkeit von  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z = 98,86\%$ , wohingegen Aufbau (8) mit der höchsten prozentualen Betriebssteifigkeit von  $E_{ID}/E_{I0} = 69,66\%$  den größten Festigkeitsverlust erfährt.



**Abb. 8.19 Gegenüberstellung rechnerisch ermittelte Zugfestigkeit (unbelastetes Laminat)  $\sigma_z$  und nach der zyklischen Biegeprüfung ermittelte Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  in Abhängigkeit vom textilen Flächengewicht  $m_A$  im Gelenkbereich und der Breite des Gelenkbereichs  $b_G$  (Beschriftung der Prüfkörper analog zu Tab. 8.5) ( $n = 3$ ).**

Die prozentuale Restzugfestigkeit beträgt für Aufbau (8) lediglich  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z = 61,22 \%$ . Aller Wahrscheinlichkeit nach führt der Abbau des Epoxidharzes durch die Biegebewegung dazu, dass eine verminderte Kraftweiterleitung zwischen den Glasfaserfilamenten stattfindet. Die Kraftaufnahme erfolgt daher nicht länger als Verbund, sondern durch die Einzelkomponenten, deren Festigkeit geringer als die des Verbundes ist [38, 101]. Für die Auslegung von FVK-Gelenkbauteilen muss dementsprechend das Zielkriterium die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  bzw. die prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  sein, um einen unkontrollierten Festigkeitsverlust über die definierte Lastspielzahl von 5.000 zu vermeiden.

### 8.3 Auslegungsmodell für die Prognose der Materialkenndaten

Auf Grundlage der Daten der Versuchsreihe aus Kapitel 8.2 wird eine Regressionsanalyse für die mechanischen Kenngrößen eines Gelenkbauteils bestehend aus dem definierten Hybridverbund mit dem Programm Minitab 19 (Minitab GmbH) durchgeführt. Zwischen der Biegespannung  $\sigma_b$  und Biegesteifigkeit  $EI$  ist eine lineare Abhängigkeit zu erkennen, die sowohl hinsichtlich der Eigenschaften im ersten Lastspiel als auch bezüglich der Eigenschaften bei Erreichen der Betriebsfestigkeit besteht. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der in Formel (8.1) dargestellten Regressionsfunktion für die initiale Biegespannung  $\sigma_{b0}$  beträgt  $R^2 = 0,9591$ , d. h. ca. 96 % aller Messwerte können auf Basis dieser Funktion erklärt werden. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß ist  $R^2_{\text{kor}} = 0,9539$ . Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion für die Biegespannung bei Betriebsfestigkeit  $\sigma_{bD}$  in Formel (8.2) ist  $R^2 = 0,9107$  bzw. das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{\text{kor}} = 0,8928$ . Die Regressionsfunktionen der Biegespannungen schließen demzufolge ca. 10 % der ermittelten Messwerte nicht ein. In Relation zur prozentualen Streuung der Messwerte, die bis zu 13,90 % für die initiale Biegespannung  $\sigma_{b0}$  bzw. bis zu 10,36 % für die Biegespannung bei Betriebsfestigkeit  $\sigma_{bD}$  beträgt, ist der Fehler der Regressionsfunktionen (8.1) und (8.2) unbedeutend klein.

$$\sigma_{b0} = 1,672 + 0,006868 \cdot EI_0 \quad (8.1)$$

$$\sigma_{bD} = 0,977 + 0,00875 \cdot EI_D \quad (8.2)$$

$\sigma_{b0}$ in MPa	$\sigma_{bD}$ in MPa	$EI_0$ in Nmm <sup>2</sup>	$EI_D$ in Nmm <sup>2</sup>
-------------------------	-------------------------	-------------------------------	-------------------------------



Die prozentuale Biegespannung bei Erreichen der Betriebsfestigkeit ergibt sich nach Formel (8.3).

$$[\sigma_{bD}/\sigma_{b0}] = \frac{\sigma_{bD} \cdot 100}{\sigma_{b0}} \quad (8.3)$$

$\sigma_{bD}/\sigma_{b0}$ in %	$\sigma_{bD}$ in MPa	$\sigma_{b0}$ in MPa
-----------------------------------	-------------------------	-------------------------

Da die Biegespannungen  $\sigma_{b0}$  und  $\sigma_{bD}$  linear von den Biegesteifigkeiten  $EI_0$  bzw.  $EI_D$  abhängig sind, müssen lediglich für die Biegesteifigkeiten ( $EI_0$  und  $EI_D$ ), nicht aber für die Biegespannungen ( $\sigma_{b0}$  und  $\sigma_{bD}$ ) Regressionsanalysen auf Basis der vier festgelegten Faktoren Gelenkbreite  $b_G$ , Übergangsbreite  $b_U$ , Anzahl Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$  und Anzahl Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222(0/90)^\circ}$  durchgeführt werden. Die Hauptfaktorendiagramme, die die Richtung des Einflusses der Faktoren auf die initiale Biegesteifigkeit  $EI_0$  zeigen, sind in Abb. 8.20 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Gelenkbreite  $b_G$  und die Schichtanzahl  $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$  bzw.  $n_{ET222(0/90)^\circ}$  einen größeren Einfluss auf die Steifigkeit haben als die Breite des Übergangsbereichs  $b_U$ .

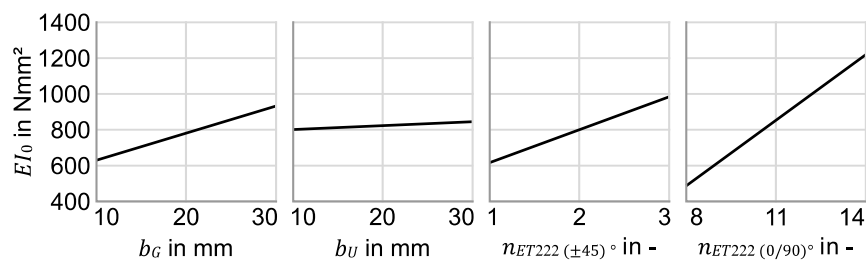
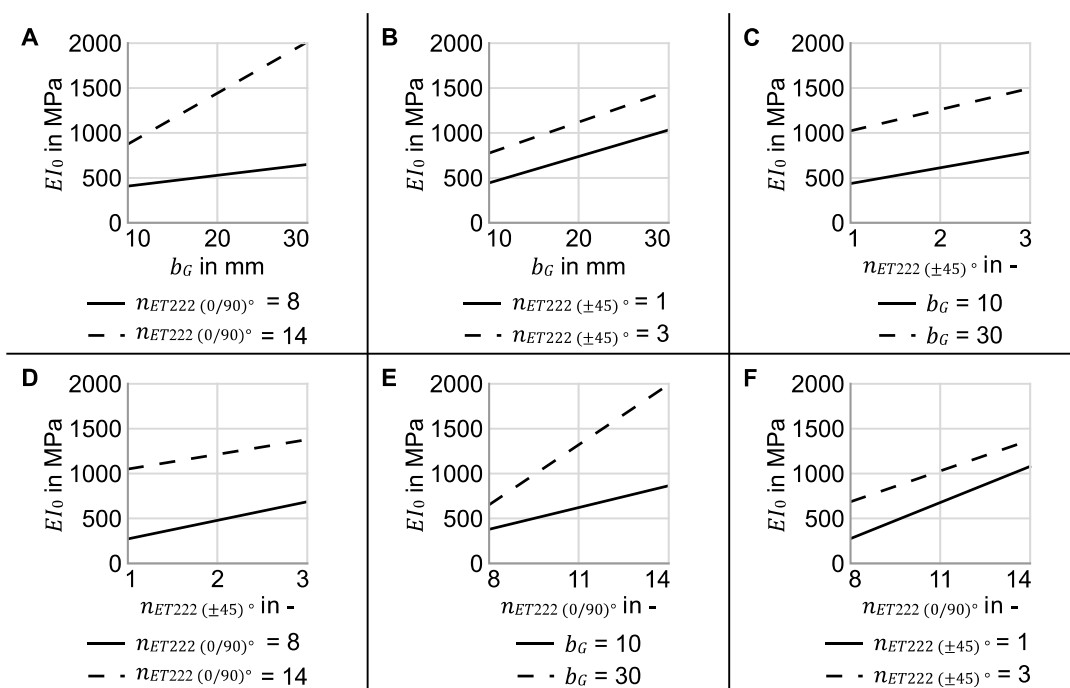


Abb. 8.20 Hauptfaktorendiagramme für initiale Biegesteifigkeit  $EI_0$ .

Neben den Einflüssen der Hauptfaktoren müssen bei der Regressionsanalyse die untrennbar vermischten Wechselwirkungen zwischen den vier Faktoren berücksichtigt werden (vgl. Abb. 8.21). Die Analyse dieser zeigt, dass die Übergangsbreite  $b_U$  mit keinem der übrigen Hauptfaktoren eine Wechselwirkung abbildet, die zu einer statistisch signifikanten Veränderung der Biegesteifigkeit  $EI_0$  führt. Die Wechselwirkungen zwischen  $b_G$  und  $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ ,  $b_G$  und  $n_{ET222(0/90)^\circ}$  sowie  $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$  und  $n_{ET222(0/90)^\circ}$  führen zu einer Zunahme der Biegesteifigkeit  $EI_0$  und müssen in der Regressionsfunktion berücksichtigt werden.



**Abb. 8.21** Diagramme statistisch signifikanter Wechselwirkungen für  $EI_0$  der drei Hauptfaktoren Gelenkbreite  $b_G$ , Übergangsbreite  $b_U$ , Anzahl Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$  und Anzahl Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222(0/90)^\circ}$ ;

**A**  $b_G \times n_{ET222(0/90)^\circ}$ , **B**  $b_G \times n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ , **C**  $n_{ET222(\pm 45)^\circ} \times b_G$ , **D**  $n_{ET222(\pm 45)^\circ} \times n_{ET222(0/90)^\circ}$ ,

**E**  $n_{ET222(0/90)^\circ} \times b_G$  und **F**  $n_{ET222(0/90)^\circ} \times n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ .

Die Regressionsfunktion für  $EI_0$  lautet:

$$\begin{aligned}
 EI_0 = & -612 - 21,4 \cdot b_G + 1,89 \cdot b_U + 249 \cdot n_{ET222(\pm 45)^\circ} + 67,8 \\
 & \cdot n_{ET222(0/90)^\circ} + 1,14 b_G \cdot n_{ET222(\pm 45)^\circ} + 3,09 \cdot b_G \\
 & \cdot n_{ET222(0/90)^\circ} - 8,2 \cdot n_{ET222(\pm 45)^\circ} \cdot n_{ET222(0/90)^\circ}
 \end{aligned} \quad (8.4)$$

$EI_0$	$b_U$	$b_G$	$n_{ET222(0/90)^\circ}$	$n_{ET222(\pm 45)^\circ}$
in Nmm <sup>2</sup>	in mm	in mm	in Anzahl Schichten	in Anzahl Schichten

Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion (8.4) beträgt  $R^2 = 0,9925$  bzw.  $R^2_{korr} = 0,8563$ . Die Streuung der Messwerte selbst beläuft sich auf 12,21 %. Somit ist die durch die Funktion abgedeckte Fläche 2,16 % geringer als die absolute Streuung der Messwerte. Diese Fehlergröße ist unter Berücksichtigung der manuellen Herstellung der Prüfkörper und des scheinbar, trotz Teflon-Stempel, unkontrollierten Fließens des Epoxidharzes in den Gelenkbereich akzeptabel. Darüber hinaus würde das Hinzufügen weiterer Faktoren zu einem überbestimmten Regressionsmodell mit einer zu geringen Anzahl an Freiheitsgraden führen.

Die Regressionsanalyse der absoluten Werte der Betriebssteifigkeit  $EI_D$  ist auf der vorliegenden Datenbasis nur mit einem unzureichenden Bestimmtheitsmaß möglich. Eine ge-

nauere Abdeckung wird erreicht, indem die Regressionsanalyse für die prozentualen Werte der Betriebssteifigkeit  $EI_D/EI_0$  durchgeführt wird. Die Haupteffektdiagramme der vier Faktoren  $b_G$ ,  $b_U$ ,  $n_{ET222}(\pm 45)^\circ$  und  $n_{ET222}(0/90)^\circ$  sind in Abb. 8.22 dargestellt.

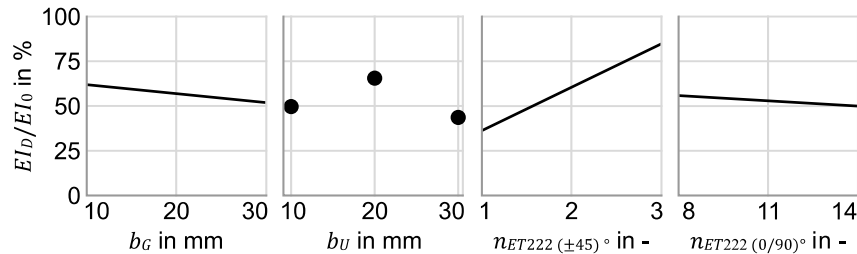


Abb. 8.22 Hauptfaktorendiagramme für  $EI_D/EI_0$ .

Die Breite des Übergangsbereichs  $b_U$  zeigt keinen richtungsabhängigen Einfluss auf die prozentuale Betriebssteifigkeit, wohingegen sowohl die Breite des Gelenkbereichs  $b_G$  als auch die Anzahl der ET222-Schichten  $n_{ET222}(\pm 45)^\circ$  und  $n_{ET222}(0/90)^\circ$  einen linearen Einfluss auf die prozentuale Betriebssteifigkeit  $EI_D/EI_0$  haben.

Die statistisch signifikanten Wechselwirkungen zwischen den drei Faktoren in Bezug auf die prozentuale Betriebssteifigkeit  $EI_D/EI_0$  sind in Abb. 8.23 dargestellt. Allgemein kann für alle dargestellten Wechselwirkungen festgestellt werden, dass die Effekte größer sind je höher die Anzahl der Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222}(0/90)^\circ$  ist. Die Wechselwirkungen zwischen  $b_G$  und  $n_{ET222}(0/90)^\circ$  sind abhängig von der Anzahl der Schichten bzw. der Breite des Gelenkbereichs  $b_G$  gegenläufig. Die Wechselwirkungen zwischen  $n_{ET222}(\pm 45)^\circ$  und  $b_G$  bzw.  $n_{ET222}(0/90)^\circ$  sind nicht dargestellt. Sie sind statistisch nicht signifikant und bleiben folglich unberücksichtigt.

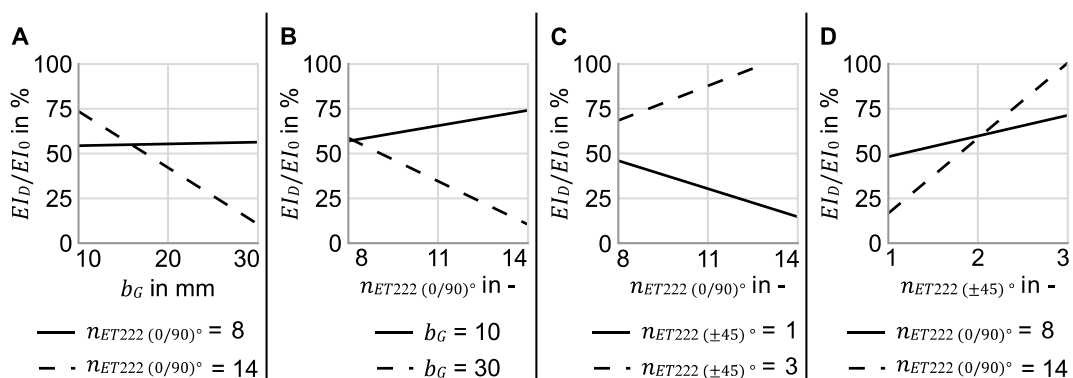


Abb. 8.23 Diagramme statistisch signifikanter Wechselwirkungen für  $EI_D/EI_0$  der drei Hauptfaktoren Gelenkbreite  $b_G$ , Anzahl Schichten mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222}(\pm 45)^\circ$  und Anzahl Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222}(0/90)^\circ$ ; **A**  $b_G \times n_{ET222}(0/90)^\circ$ , **B**  $n_{ET222}(0/90)^\circ \times b_G$ , **C**  $n_{ET222}(0/90)^\circ \times n_{ET222}(\pm 45)^\circ$  und **D**  $n_{ET222}(\pm 45)^\circ \times n_{ET222}(0/90)^\circ$ .

Aus den festgelegten statistisch signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen kann die nachstehende Regressionsfunktion (8.5) für die prozentuale Betriebssteifigkeit  $EI_D/EI_0$  abgeleitet werden. Das Bestimmtheitsmaß der Funktion beträgt  $R^2 = 0,9986$  bzw.  $R^2_{\text{korr}} = 0,9918$ . Der Fehler der Funktion ist dementsprechend unerheblich.

$$[EI_D/EI_0] = 71,81 + 2,004 \cdot b_G - 35,88 \cdot n_{ET222(\pm 45)^\circ} - 4,664 \cdot n_{ET222(0/90)^\circ} - 0,2444 \cdot b_G \cdot n_{ET222(0/90)^\circ} + 5,926 \cdot n_{ET222(\pm 45)^\circ} \cdot n_{ET222(0/90)^\circ} \quad (8.5)$$

$EI_D/EI_0$ in %	$b_G$ in mm	$n_{ET222(0/90)^\circ}$ in Anzahl Schichten	$n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ in Anzahl Schichten
---------------------	----------------	--	--

Aus der Regressionsfunktion (8.5) für die prozentuale Betriebssteifigkeit  $EI_D/EI_0$  kann die Funktion für die Betriebssteifigkeit  $EI_D$  abgeleitet werden:

$$EI_D = EI_0 \cdot \frac{[EI_D/EI_0]}{100} \quad (8.6)$$

$EI_D$ in Nmm <sup>2</sup>	$EI_0$ in Nmm <sup>2</sup>	$EI_D/EI_0$ in %
-------------------------------	-------------------------------	---------------------

Für die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach 5.000 Lastspielen kann wie im Fall der Betriebsbiegesteifigkeit  $EI_D$  eine exaktere Regression auf Basis der prozentualen Werte durchgeführt werden. Die Hauptfaktoren und ihr Einfluss auf die prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  sind in Abb. 8.24 dargestellt.

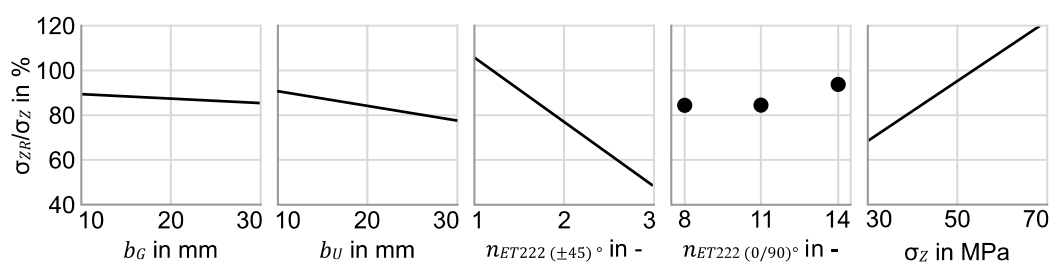
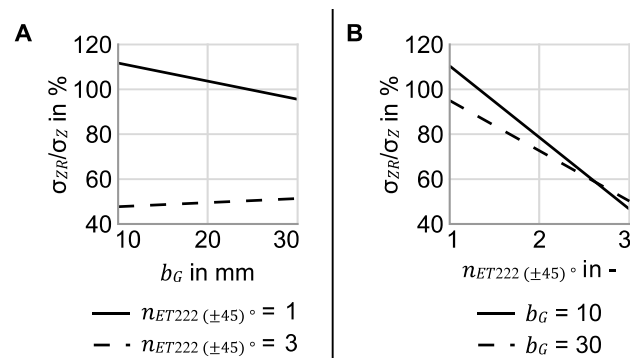


Abb. 8.24 Hauptfaktorendiagramme für prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ .

Die Anzahl der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222(0/90)^\circ}$  hat keinen statistisch signifikanten, linearen Einfluss und findet daher im Regressionsmodell keine Anwendung. Dagegen müssen die Gelenkbreite  $b_G$ , die Übergangsbreite  $b_U$  und die Anzahl ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$  in der Regression berücksichtigt werden. Der Einschluss der kalkulierten initialen Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  (vgl. Kapitel 6.1) in die Regression führt darüber hinaus zu einer exakteren Bestimmung der prozentualen Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ . Dabei ist der Einfluss der Gelenkbreite  $b_G$  und der Übergangsbreite  $b_U$  nicht so groß zu bewerten wie der der ET222-Schichten  $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ .

bzw. der berechneten initialen Zugfestigkeit  $\sigma_Z$ . Dennoch beeinflussen diese geometrischen Parameter die prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ . Eine Regressionsanalyse unter Ausschluss beider Faktoren führt zu einem falschen Ergebnis.

Die Wechselwirkung zwischen  $b_G$  und  $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$  (vgl. Abb. 8.25) hat eine statistisch signifikante Abnahme der prozentualen Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  zur Folge und muss daher ebenfalls in die Regressionsfunktion eingeschlossen werden.



**Abb. 8.25** Diagramme statistisch signifikanter Wechselwirkungen für die prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  der zwei Hauptfaktoren Gelenkbreite  $b_G$  und Anzahl Schichten mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ ;  
**A**  $b_G \times n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ , **B**  $n_{ET222(\pm 45)^\circ} \times b_G$ .

Es ergibt sich dementsprechend die Regressionsfunktion (8.7). Das Bestimmtheitsmaß ist  $R^2 = 0,9957$  bzw.  $R^2_{\text{korrr}} = 0,9742$ . Der statistische Fehler ist folglich auch für  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  vernachlässigbar.

$$[\sigma_{ZR}/\sigma_Z] = 71,5 - 1,462 \cdot b_G - 1,058 \cdot b_U - 244,7 \cdot n_{ET222(\pm 45)^\circ} + 9,82 \cdot \sigma_{ZG} + 0,9088 \cdot b_G \cdot n_{ET222(\pm 45)^\circ} \quad (8.7)$$

$\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ in %	$b_G$ in mm	$b_U$ in mm	$\sigma_{ZG}$ in MPa	$n_{ET222(\pm 45)^\circ}$ in Anzahl Schichten
--------------------------------	----------------	----------------	-------------------------	--

Die absolute Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  lässt sich auf Basis der rechnerisch ermittelten Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  des Laminataufbaus im Gelenkbereich und der Regressionsfunktion von  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  (8.7) nach Formel (8.8) bestimmen.

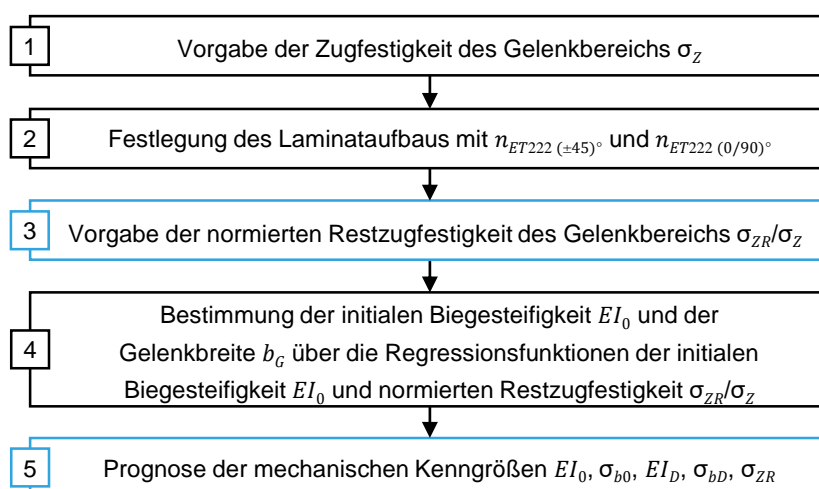
$$\sigma_{ZR} = \sigma_Z \cdot \frac{[\sigma_{ZR}/\sigma_Z]}{100} \quad (8.8)$$

$\sigma_{ZR}$ in MPa	$\sigma_Z$ in MPa	$\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ in %
-------------------------	----------------------	--------------------------------

Auf Basis der dargestellten Regressionsfunktionen kann die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach  $N = 5.000$  Lastspielen eingestellt und die mechanischen Kennwerte eines Gelenkbauteils

prognostiziert werden. Dabei sollte die Übergangsbreite  $b_U$  auf einen fixen Wert von 10 mm eingestellt werden, da der Einfluss auf die Biegesteifigkeiten  $EI_0$  und  $EI_D$  im Vergleich zu den anderen Hauptfaktoren vergleichsweise gering ist. Zudem ist der Einfluss auf die prozentuale Betriebssteifigkeit  $EI_D/EI_0$  nicht linear, wodurch sich bei gleichzeitiger Bestimmung von  $b_G$  und  $b_U$  in Abhängigkeit von der festgelegten prozentualen Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  falsche geometrische Einstellungen ergeben könnten.

In Abb. 8.26 sind die fünf Schritte gezeigt, die für die Ermittlung der Gelenkbreite  $b_G$  und die Prognose der mechanischen Kenndaten eines FVK-Gelenkbauteils mit dem definierten Hybridverbund durchgeführt werden müssen.



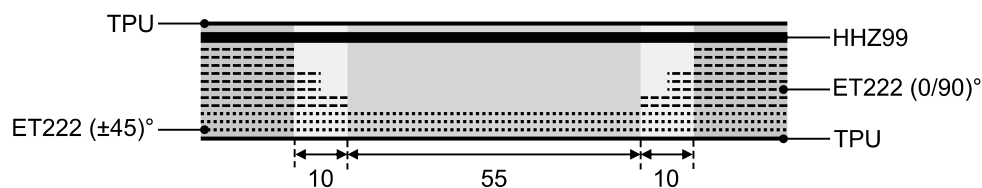
**Abb. 8.26** Arbeitsflussdiagramm für die Ermittlung der Bauteilgeometrie eines Gelenkbauteils entsprechend der festgelegten Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach  $N = 5.000$  Lastspielen und Prognose der Materialkenndaten.

Es ergibt sich zunächst die notwendige Zugfestigkeit des Gelenkbereichs auf Basis der zu tragenden Last im Verschattungsbauteil. Entsprechend der geforderten Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  kann der Laminataufbau festgelegt werden. Der Laminataufbau muss so gewählt werden, dass die sich tatsächlich einstellende Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  stets höher ist als die mindestens notwendige Zugfestigkeit. Im dritten Arbeitsschritt gilt es die notwendige prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  nach  $N = 5.000$  Lastspielen festzulegen. Die Gleichungssysteme für die initiale Biegesteifigkeit  $EI_0$  (8.4) und die prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  (8.7) werden gelöst und die Gelenkbreite  $b_G$  sowie die resultierende initiale Biegesteifigkeit  $EI_0$  ausgegeben. Aufgrund der Herstellbarkeit wird die Gelenkbreite  $b_G$  für die Prognose der mechanischen Kenndaten in 5 mm-Schritten aufgerundet. Mit der gerundeten Gelenkbreite werden die mechanischen Kenngrößen  $EI_0, \sigma_{b0}, EI_D, \sigma_{bD}$  und  $\sigma_{ZR}$  prognostiziert.

## Validierung des hergeleiteten Auslegungsmodells

Das auf der Regressionsanalyse basierende Auslegungsmodell wird innerhalb dieser Arbeit mit der Optimierung der prozentualen Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  von Prüfkörperaufbau (8) validiert. Der Prüfkörperaufbau (8) hat eine Gelenkbreite  $b_G = 30$  mm, eine Übergangsbreite  $b_U = 10$  mm und  $n_{ET222 (\pm 45)^\circ} = 3$  sowie  $n_{ET222 (0/90)^\circ} = 8$  Schichten. In den durchgeführten Versuchen ist für Prüfkörperaufbau (8) mit  $EI_D/EI_0 = 69,99$  % der geringste Steifigkeitsverlust messbar. Dessen ungeachtet ist der Festigkeitsverlust  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z = 61,22$  % für diesen Aufbau am größten.

Für den optimierten Prüfkörper (8A) wird eine prozentuale Restzugfestigkeit von  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z = 90$  % vorgegeben. Die Anzahl der Schichten  $n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$  und  $n_{ET222 (0/90)^\circ}$  sowie die Breite des Übergangsbereichs  $b_U$  bleiben gleich bzw. entsprechen dem Aufbau von dem Gelenkbauteil-Prüfkörper (8). Rechnerisch wird eine Gelenkbreite  $b_G = 52,80$  mm ermittelt. Der berechnete Wert wird zum nächsten 5 mm-Schritt gerundet. Somit beträgt die Gelenkbreite für den Gelenkbauteil-Prüfkörper (8A)  $b_G = 55$  mm. Der Laminataufbau des Prüfkörpers (8A) ist in Abb. 8.27 dargestellt.



**Abb. 8.27 Schematische Darstellung des Laminataufbaus des Gelenkbauteil-Prüfkörpers (8A) (vor dem Pressprozess) mit angepasster Gelenkbreite.**

Der Prüfkörper (8A) wird mit den gleichen Einstellungen wie die bisherigen Prüfkörper (1) bis (10) (vgl. Tab. 8.6) im zyklischen Biegeprüfstand geprüft. Die Betriebsfestigkeit wird nach  $N_D = 63 \pm 16$  Lastspielen erreicht. In Abb. 8.28 ist exemplarisch ein Kurvenverlauf für einen Prüfkörper mit dem Aufbau (8A) dargestellt. Die initiale Biegespannung  $\sigma_{b0}$  beträgt 8,01 MPa und die initiale Biegesteifigkeit  $EI_0$  ist 964,41 Nmm<sup>2</sup> im ersten Lastspiel. Nach  $N_D = 54$  Lastspielen stellt sich die Betriebsfestigkeit des Gelenkbauteil-Prüfkörpers ein. Die Betriebsbiegespannung entspricht mit  $\sigma_{bD} = 7,32$  MPa 91,39 % der initialen, maximalen Biegespannung  $\sigma_{b0}$ . Die Biegesteifigkeit  $EI_0$  wird um 22,66 % auf  $EI_D = 731,96$  MPa reduziert. Drei Prüfkörper werden im Anschluss an die zyklische Biegeprüfung in der Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-4:1997 [20] geprüft. Die Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  des in Abb. 8.28 dargestellten Gelenkbauteil-Prüfkörpers beträgt 66,05 MPa.

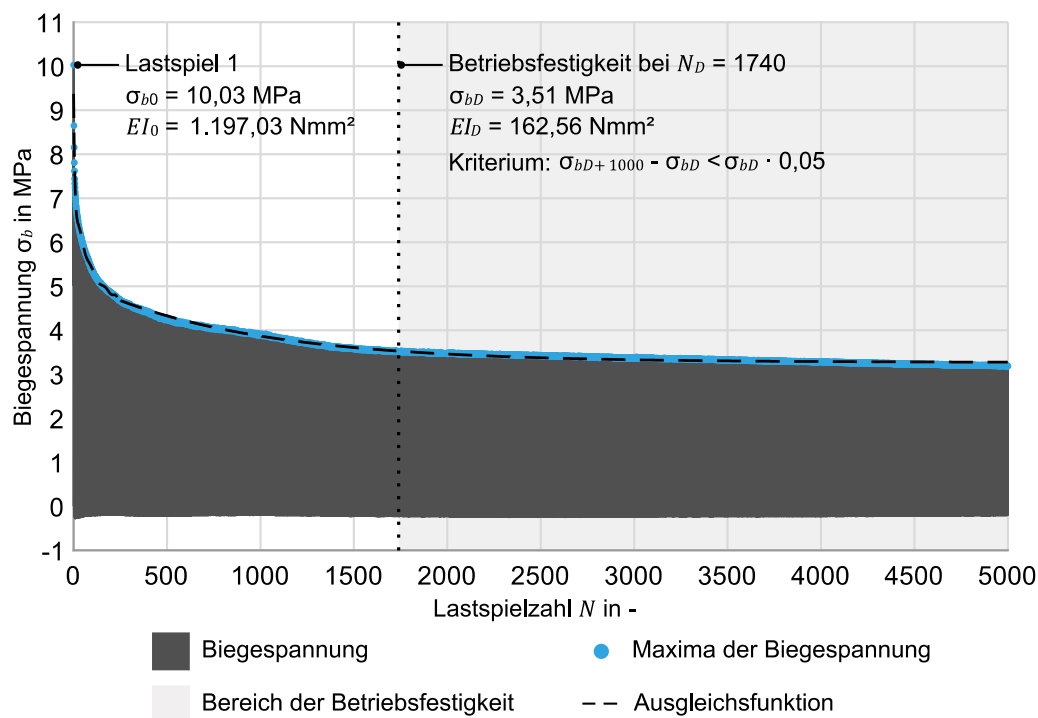


Abb. 8.28 Exemplarische Ergebniskurve eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit Aufbau (8A) analog zu Abb. 8.27 mit Erreichen der Betriebsfestigkeit nach  $N_D = 54$  Lastspielen.

Die Mittelwerte der mechanischen Kenngrößen aus der experimentellen Prüfung aller Gelenkbauteil-Prüfkörper mit dem Laminataufbau (8A) sind in Tab. 8.10 den prognostizierten mechanischen Kenngrößen gegenüber gestellt. Die Abweichung der experimentell ermittelten Werte gegenüber den prognostizierten Werten beträgt max. 11,50 %. Die prognostizierte Betriebsbiegesteifigkeit  $EI_D$  und Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  liegen im Streuungsbereich der experimentell ermittelten Werte. Die initiale Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  beträgt, rechnerisch ermittelt, 70,91 MPa. Die prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  ist mit 92,78 % sogar höher als die geforderte prozentuale Restzugfestigkeit von 90 %.

Tab. 8.10 Gegenüberstellung prognostizierter Materialkennwerte des Gelenkbauteil-Prüfkörpers (8A) mit angepasster Bauteilgeometrie und experimentell ermittelter Materialkennwerte ( $n = 5$  in Bezug auf die Biegeeigenschaften;  $n = 3$  in Bezug auf die Zugeigenschaften).

		rechnerisch prognostiziert	experimentell ermittelt	Abweichung Mittelwert absolut	Abweichung Mittelwert in %
$EI_0$	in Nmm <sup>2</sup>	870,20	959,28 ± 17,09	89,08	10,24
$\sigma_{b0}$	in MPa	7,11	7,86 ± 0,34	0,75	10,55
$EI_D$	in Nmm <sup>2</sup>	624,51	696,34 ± 73,39	71,83	11,50
$\sigma_{bD}$	in MPa	6,44	7,15 ± 0,32	0,71	11,02
$\sigma_{ZR}$	in MPa	65,80	65,83 ± 2,89	0,03	0,05



Die dargestellten Ergebnisse für Prüfkörperaufbau (8A) validieren die Funktionsfähigkeit des Regressionsmodells für die Auslegung von FVK-Gelenkbauteilen zur gezielten Einstellung der Festigkeitseigenschaften im Dauerbetrieb. So kann die eingangs aufgestellte Arbeitshypothese (4), dass durch die äußere Geometrie die Lebensdauer des Bauteils erhöht werden kann, bestätigt werden. Für die Übertragung des in dieser Arbeit entwickelten Hybridverbunds auf adaptive Fassadenbauteile und die industrielle Anwendung ist dies wesentlich: Das Regressionsmodell ermöglicht so die schnelle Festlegung der Gelenkbauteilgeometrie in Abhängigkeit von den Lamineigenschaften zur gezielten Einstellung der Betriebsfestigkeit eines adaptiven Fassadenbauteils.



## 9. Zusammenfassung

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird ein Hybridverbund entwickelt, der die technische Umsetzung von FVK-Gelenkbauteilen für außen liegende, adaptive Fassadenbauteile erlaubt. Mit dem Ziel Grundlagenkenntnisse über diesen Materialverbund und die technologischen Zusammenhänge im Gelenkbauteil herauszuarbeiten, werden in der Arbeit vier Arbeitshypothesen überprüft:

- (1) Durch die Kombination von Elastomer mit duroplastischem Faserverbundkunststoff kann ein Hybridmaterial hergestellt werden, das die Anforderungen an außen liegende Fassadenbauteile erfüllt.
- (2) Durch einen angepassten Laminataufbau im Gelenk- und Bauteilbereich kann die Steifigkeit und Festigkeit dieser Bereiche gezielt eingestellt und beeinflusst werden.
- (3) Durch die Entwicklung einer neuen Prüfmethodik für FVK-Gelenkbauteile können sowohl ihre Biegeeigenschaften als auch ihre Zugfestigkeit, nach einer definierten Anzahl Lastspiele, zur Auslegung von FVK-Gelenkbauteilen ermittelt werden.
- (4) Durch die Anpassung der äußeren Geometrie können die Beanspruchungen in den einzelnen Komponenten des FVK-Gelenkbauteils reduziert und somit die Lebensdauer erhöht werden.

Für die Überprüfung von Arbeitshypothese (1) werden fünf Anforderungskriterien an das Material von adaptiven FVK-Gelenkbauteilen für Außenfassadenbauteile gestellt:

- (1) Steifigkeitsvariation trotz Materialhomogenität
- (2) Witterungsstabilität
- (3) Verbundfestigkeit zwischen den Einzelschichten des Hybridverbunds
- (4) Glasübergangstemperatur außerhalb von  $-20\text{ °C}$  bis  $+80\text{ °C}$
- (5) Baustoffklasse B2

Ausgehend von einer Materialauswahl, die im Einzelnen laut dem Stand der Technik prinzipiell geeignet sind, werden diese fünf Anforderungskriterien schrittweise überprüft. Bei diesem Vorgehen hat jede Prüfung eine Art Filterwirkung auf die eingangs aufgestellte Materialauswahl, so dass am Ende der Materialentwicklung nur eine mögliche Kombination für die Anwendung in FVK-Gelenkbauteilen zur Verfügung steht. Die aus fünf Schritten bestehende, innerhalb dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Entwicklung von Materialien für adaptive Bauteile kann verallgemeinert auf FVK-Gelenkbauteile mit dem Einsatz als Außenfassadenbauteil übertragen werden.

Innerhalb der schrittweise durchgeführten Materialentwicklung wird die Steifigkeit der Materialien in einer 2-Punkt-Biegeprüfung und die Zugfestigkeit des Materialverbunds nach Bewitterung überprüft. Darüber hinaus wird die interlaminare Haftung zwischen den Einzelschichten des Materialverbunds unter Mode I-Belastung und die Glasübergangstem-

peratur der Einzelschichten und des gesamten Hybridverbunds in der Dynamisch-Mechanisch-Thermischen Analyse ermittelt. Im letzten Schritt wird die Entflammbarkeit des Hybridverbunds geprüft. Nach diesem systematischen Vorgehen wird ein Glasfaser-Epoxidharz-Prepreg (ET222), ein duroplastisches Elastomer auf EVA-Basis (HHZ99) und eine TPU-Kaschierfolie (TPU) für den Aufbau eines Hybridverbunds zur Herstellung von FVK-Gelenkbauteilen als geeignet festgelegt. Aufgrund der Verfügbarkeit wird HHZ99, obwohl diese Elastomertype die Anforderungen an die Glasübergangstemperatur nicht erfüllt, eingesetzt. Die Biegeeigenschaften zeigen keinen signifikanten Unterschied zu der nur als Versuchstypen verfügbaren Elastomertype HHZ82, die mit einem höheren Polyethylen-Anteil die Anforderungen an die Glasübergangstemperatur erfüllt. Arbeitshypothese (1), nach der durch die Kombination von Elastomer und FVK ein Hybridmaterial herstellbar ist, das die Anforderungen an ein adaptives Außenfassadenbauteil erfüllt, kann demnach bestätigt werden.

Zur Bearbeitung und Überprüfung von Arbeitshypothese (2) ist für FVK im Normalfall die klassische Laminattheorie anzuwenden. Der Hybridverbund erfüllt jedoch nicht die Bedingungen für diese: Symmetrie des Laminataufbaus mit Schichten gleicher Dicke und konstante Dicke der Schichten unter Verformung. Daher wird innerhalb dieser Arbeit eine andere Rechenmethodik zur Bestimmung der Festigkeits- und Biegeeigenschaften ausgearbeitet und angewandt. Grundlage der Berechnung ist die Ermittlung der mechanischen Kenngrößen für alle Einzelschichten des Hybridverbunds, verarbeitet unter den definierten Herstellungsparametern im Pressprozess. Für die Berechnung der Zugfestigkeit  $\sigma_z$  wird eine Parallelschaltung der einzelnen Schichten, analog zu einem Federsystem, angenommen. Die Einzelschichten mit höherer Steifigkeit nehmen anteilig höhere Kräfte auf. Es ist feststellbar, dass das Versagen des Gelenkbauteils unter Zuglast von den  $(\pm 45)^\circ$ -orientierten Schichten ET222 im Gelenkbereich bzw. den  $(0/90)^\circ$ -orientierten Schichten ET222 im Bauteilbereich abhängig ist. Die Biegesteifigkeit  $EI$  wird unter Annahme eines Kräftegleichgewichtes bei Belastung durch ein Biegemoment berechnet. Hierbei ist die Verschiebung der neutralen Faser im unsymmetrischen Laminataufbau zu berücksichtigen und in die Berechnung der Flächenträgheitsmomente der Einzelschichten einzubeziehen.

Die Berechnung von Zugfestigkeit  $\sigma_z$  und Biegesteifigkeit  $EI$  auf Basis der entwickelten Rechenmethodik wird innerhalb der Arbeit exemplarisch für einen Gelenkbereich mit einer Schicht ET222 mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$  und einen Bauteilbereich mit zusätzlichen acht Schichten ET222 mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$  durchgeführt. Die rechnerisch ermittelten Ergebnisse werden experimentell durch Zug- und 3-Punkt-Biegeprüfungen validiert. Unter Annahme einer Komprimierung der in der 3-Punkt-Biegeprüfung oben liegenden TPU- und HHZ99-Schicht um 45 % zeigen die berechneten Biegesteifigkeiten für den Gelenkbereich eine genaue Übereinstimmung und für den Bauteilbereich eine Abweichung kleiner 10 % vom Mittelwert der experimentell ermittel-

ten Biegesteifigkeit. Dies gilt ebenso für die Zugfestigkeiten: Die rechnerisch bestimmten Werte liegen für den Gelenkbereich im Streubereich der experimentell ermittelten Werte. Für den Bauteilbereich beträgt die max. Abweichung -11,55 % vom Mittelwert. Arbeitshypothese (2), nach der die Steifigkeit und Festigkeit des Bauteil- und Gelenkbereichs durch einen angepassten Lagenaufbau gezielt eingestellt werden kann, wird durch die dargestellten Berechnungen nicht nur bestätigt, sondern darüber hinaus eine Methodik bereitgestellt, durch die diese Eigenschaften für unterschiedliche Laminataufbauten prognostizierbar sind.

Zur Untersuchung der Biegeeigenschaften von Gelenkbauteilen wird innerhalb dieser Arbeit entsprechend Arbeitshypothese (3) ein Prüfstand für eine zyklische Biegeprüfung entwickelt, der eine Biegung der Gelenkbauteile um bis zu  $180^\circ$  zulässt. Der Kräfteintrag ist stets senkrecht zur Bauteilfläche und die Kraft kann ohne Reibungsverluste gemessen werden. Die festgelegte Prüfkörpergeometrie erlaubt die Zugprüfung der Gelenkbauteile zur Bestimmung der Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}$  nach einer definierten Lastspielzahl  $N$ . Für die erhobene Datenbasis wird eine Auswertungsmethodik entwickelt. Zum einen wird ein Versagens- bzw. Bruchkriterium definiert, nach dem ein Gelenkbauteil versagt, wenn die maximale Biegespannung  $\sigma_b$  um 70 % geringer ist als im ersten Lastspiel. Zum anderen wird der Beginn der Betriebsfestigkeit eines Gelenkbauteils auf das Lastspiel festgelegt, bei dem die maximale Biegespannung eine Differenz kleiner als 5 % nach weiteren 1.000 Lastspielen aufweist. Entsprechend Arbeitshypothese (3) steht somit, durch den entwickelten Prüfstand und der dazu aufgestellten Auswertungsmethodik, eine Prüfmethode zur Verfügung, die die mechanische Untersuchung von FVK-Gelenkbauteilen unter einem Biegewinkel von bis zu  $180^\circ$  erlaubt.

Der entwickelte Prüfstand ist die Basis für die Analyse der geometrischen Auslegungskriterien eines FVK-Gelenkbauteils zur Überprüfung von Arbeitshypothese (4). Zunächst werden die relevanten Auslegungskriterien für ein FVK-Gelenkbauteil basierend auf den Ergebnissen von vergleichenden 2-Punkt-Biegeprüfungen festgelegt. Nachstehende vier werden als relevant festgelegt und in einer statistisch geplanten Versuchsreihe untersucht:

- (1) Gelenkbreite  $b_G$
- (2) Übergangsbreite  $b_U$
- (3) Anzahl der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222 (\pm 45)^\circ}$
- (4) Anzahl der Schichten mit einer Faserorientierung von  $(0/90)^\circ$   $n_{ET222 (0/90)^\circ}$

Zugleich wird die Funktionsweise des Prüfstands und die festgelegte Auswertungsmethodik durch diese Versuchsreihe validiert. Die Versuchsreihe bildet die Datenbasis für eine Regressionsanalyse, die ein Auslegungsmodell für FVK-Gelenkbauteile bestehend aus dem Hybridverbund bereitstellt. Für einen Prüfkörper der Versuchsreihe wird das Auslegungsmodell angewandt, um die prozentuale Restzugfestigkeit  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$  des Gelenkbauteils

ohne Änderung des Laminataufbaus zu verbessern. Mit einer Gelenkbreite  $b_G = 30$  mm beträgt die Restzugfestigkeit 61,22 %. Die Zielvorgabe einer Restzugfestigkeit von  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z = 90$  % im Auslegungsmodell führt zu einer Verbreiterung der Gelenkbreite auf  $b_G = 55$  mm. Die experimentelle Überprüfung ergibt eine Restzugfestigkeit von  $\sigma_{ZR}/\sigma_Z = 92,78$  %. Die Abweichung der prognostizierten mechanischen Kennwerte zu den experimentell ermittelten beträgt maximal 10,32 % und ist somit geringer als die Streuung der Messwerte in der gesamten Versuchsreihe im Allgemeinen. Der Prüfkörper validiert folglich nicht nur das Auslegungsmodell, sondern ebenso Arbeitshypothese (4), nach der die Lebensdauer eines Gelenkbauteils durch geometrische Anpassung erhöht werden kann.

Die Arbeit stellt somit nicht nur einen Materialaufbau, der für die Anwendung in adaptiven Fassadenverschattungsbauteilen geeignet ist, sondern ebenso die Methodik zur Entwicklung eines solchen Materials zur Verfügung. Darüber hinaus wird eine Methodik zur Berechnung der Laminateneigenschaften in dem Gelenk- und Bauteilbereich eines FVK-Gelenkbauteils bereitgestellt. Durch das hergeleitete Auslegungsmodell kann die Geometrie eines FVK-Gelenkbauteils mit definiertem Laminataufbau unter Vorgabe der Restzugfestigkeit nach 5.000 Lastspielen bestimmt werden. Die entwickelte Prüfmethodik bildet daneben die Basis für weiterführende mechanische Untersuchungen an FVK-Gelenkbauteilen mit großen Verformungswinkeln im Allgemeinen bzw. der weiteren Detailuntersuchung der mechanischen Effekte im entwickelten Hybridverbund im Speziellen.

## 10. Ausblick

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Hybridverbunds für FVK-Gelenkbauteile auf Basis von duromeren Materialien gezeigt. Diese Materialkombination wurde einerseits aufgrund der Kriechneigung von Thermoplasten gewählt, andererseits, um ein gutes Rückstellvermögen des Gelenkbauteils durch das entropieelastische Verformungsverhalten von duromeren Materialien zu gewährleisten. Die Ergebnisse der innerhalb dieser Arbeit durchgeführten zyklischen Versuche zeigen allerdings auch, dass je kleiner die Gelenkbreite  $b_G$  und je höher die Anzahl der ET222-Schichten mit einer Faserorientierung von  $(\pm 45)^\circ$   $n_{ET222} (\pm 45)^\circ$  ist, desto stärker wird das Epoxidharz durch die Biegebewegung mechanisch belastet und desto kleiner die verbleibende Reststeifigkeit  $E_{ID}$ . Aufgrund der ermittelten Restzugfestigkeiten der zyklisch geprüften Gelenkbauteile ist anzunehmen, dass die im Gelenkbereich eingebrachten Glasfasern im Vergleich zur Bettungsmasse eine geringere Schädigung durch die zyklische Biegebewegung erfahren. Demnach kann es für FVK-Gelenkbauteile, deren Gelenkbreite möglichst gering, aber dennoch – auch im Dauerbetrieb – eine hohe Steifigkeit aufweisen soll, sinnvoll sein, ein thermoplastisches Matrixmaterial zu verwenden. Allerdings müssen die Verstärkungsfasern bei einem solchen Materialaufbau der Kriechneigung des Thermoplasts entgegenwirken. Kohlenstofffasern haben im Vergleich zu Glasfasern eine deutlich geringere Dehnung. Folglich ist eine Kombination aus Kohlenstofffasern und Thermoplast bzw. thermoplastischem Elastomer für diesen Fall denkbar. Ob dieser Materialaufbau die technischen Anforderungen erfüllt, kann anhand der innerhalb dieser Arbeit dargelegten methodischen Vorgehensweise überprüft werden.

Innerhalb dieser Arbeit werden die mechanischen Eigenschaften rein analytisch in Bezug auf die Geometrie eines Zugprüfkörpers analysiert. Für die Übertragung in den technischen Anwendungsfall ist es notwendig die dargestellten technologischen Zusammenhänge in ein Finite Elemente-Modell zu übertragen. Dieses Modell muss auf die CAD-Daten eines Fassadenverschattungsbauteils anwendbar sein. Durch die Kopplung von FE-Modell und CAD-Daten ist es möglich den Laminataufbau und die Gelenkgeometrie entsprechend der notwendigen Materialeigenschaften in den unterschiedlichen Bauteilbereichen des Fassadenverschattungsbauteils zu definieren. Neben der Betrachtung der Gelenk- bzw. Übergangsbereiche wird bei der Übertragung der Ergebnisse dieser Arbeit auf eine Bauteilgeometrie mit Faltungsmuster auch die Betrachtung der möglichen Spannungskonzentrationen in den Kreuzungsbereichen der Falzlinien relevant. Durch den Einsatz der Finiten-Elemente-Methode können Zeit und Kosten bei der Bauteilplanung eingespart werden, da eine geringere Anzahl Versuchsbauteile notwendig wird. Dies ist insbesondere im architektonischen Kontext des Bauwesens von Bedeutung, da es sich hier meist um Einzelanfertigungen handelt und nicht auf eine generelle Datenbasis aus anderen Fassadenverschattungssystemen zurückgegriffen werden kann.

Bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der Fassadenverschattung muss der Aktuierungsmechanismus für das adaptive Fassadenbauteil ebenso wie das Bauteil selbst berücksichtigt werden. Etablierte Antriebssysteme erfordern mechanische Gelenke mit den innerhalb dieser Arbeit thematisierten Nachteilen bei einer Außenanwendung. Insbesondere für adaptive Bauteile aus Faserverbundkunststoff mit großflächigen Verformungen gibt es Ansätze für die Aktuierung der Verformung über Druck beaufschlagte, innen liegende Kammern. Für FVK-Gelenkbauteile mit lokaler Nachgiebigkeit gilt es, diese Form der Aktuierung zu untersuchen und bei Anwendbarkeit eine Methodik für die Integration in Bauteil und Herstellungsprozess zu entwickeln.

Erste Demonstratoren, die auf Basis der innerhalb dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse hergestellt wurden, bspw. Flectofold und Flexafold, zeigen die Funktionalität des entwickelten Materialaufbaus [12, 13, 62, 76, 91, 94]. Neben der Baubranche können allerdings auch andere Industriezweige von der Implementierung nachgiebiger FVK-Gelenkbauteile profitieren. So werden bspw. im Bereich der Soft Robotics Materialien mit hoher Betriebsfestigkeit benötigt. Auch eine Anwendung in der Luft- und Raumfahrt- oder der Automobilbranche in Form von Aeroshuttern, adaptiven Außenhüllen oder Landeklappen ist denkbar.



# Formelverzeichnis

(4.1)	2-Punkt-Biegeprüfung: Biegespannung $\sigma_b$ .....	25
(4.2)	2-Punkt-Biegeprüfung: Biegesteifigkeit $EI$ .....	25
(4.3)	3-Punkt-Biegeprüfung: Prüfungsgeschwindigkeit $v$ .....	26
(4.4)	3-Punkt-Biegeprüfung: Biegespannung $\sigma_b$ .....	26
(4.5)	3-Punkt-Biegeprüfung: Biegesteifigkeit $EI$ .....	26
(4.6)	Allgemeine Form der Regressionsfunktion .....	32
(4.7)	Empirisches Bestimmtheitsmaß $R^2$ .....	32
(4.8)	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß $R^2_{korr}$ .....	32
(6.1)	Hookesches Gesetz.....	54
(6.2)	Bedingung Zugfestigkeit: Dehnung in allen Einzelschichten gleich .....	54
(6.3)	Bedingung Zugfestigkeit: Verhältnis von Zugspannung und E-Modul in allen Einzelschichten gleich.....	54
(6.4)	Vergleich der Einzelschichten TPU und HHZ99 im Hinblick auf ihren Anteil an der Zugfestigkeit.....	55
(6.5)	Vergleich der Einzelschichten TPU und ET222 ( $\pm 45^\circ$ ) im Hinblick auf ihren Anteil an der Zugfestigkeit.....	55
(6.6)	Vergleich der Einzelschichten ET222 ( $\pm 45^\circ$ ) und ET222 (0/90) $^\circ$ im Hinblick auf ihren Anteil an der Zugfestigkeit .....	55
(6.7)	Federsteifigkeit $D$ (1) .....	56
(6.8)	Federsteifigkeit $D$ (2) .....	56
(6.9)	Annahme bzgl. der Längenänderung $\Delta l$ unter Zuglast .....	56
(6.10)	Annahme bzgl. der wirkenden Kraft $F_{ges}$ unter Zuglast .....	56
(6.11)	Annahme bzgl. der Federsteifigkeit $D_{ges}$ unter Zuglast.....	56
(6.12)	Kraft $F_k$ in den Einzelschichten des Hybridverbunds unter Berücksichtigung der Federsteifigkeiten $D_k$ der Einzelschichten (1) .....	57
(6.13)	Kraft $F_k$ in den Einzelschichten des Hybridverbunds unter Berücksichtigung der Federsteifigkeiten $D_k$ der Einzelschichten (2) .....	57
(6.14)	Zugfestigkeit $\sigma_z$ .....	58
(6.15)	Berechnung $F_{zul}$ in Gelenk- und Bauteilbereich .....	58
(6.16)	Berechnung der Verschiebung der neutralen Faser $\Delta NF_{Gelenk}$ im Gelenkbereich .....	60
(6.17)	Berechnung der Kraft $F_1$ im Gelenkbereich bei Annahme des Momentengleichgewichtes unter Biegelast.....	61
(6.18)	Berechnung der Kraft $F_2$ im Gelenkbereich bei Annahme des Momentengleichgewichtes unter Biegelast.....	61

(6.19) Berechnung der Kraft $F_3$ im Gelenkbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.20) Berechnung der Kraft $F_4$ im Gelenkbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.21) Berechnung der Kraft $F_5$ im Gelenkbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.22) Berechnung der Verschiebung der neutralen Faser $\Delta NF_{Bauteil}$ im Bauteil- bereich .....	61
(6.23) Berechnung der Kraft $F_1$ im Bauteilbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.24) Berechnung der Kraft $F_2$ im Bauteilbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.25) Berechnung der Kraft $F_3$ im Bauteilbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.26) Berechnung der Kraft $F_4$ im Bauteilbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.27) Berechnung der Kraft $F_5$ im Bauteilbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.28) Berechnung der Kraft $F_6$ im Bauteilbereich bei Annahme des Momenten- gleichgewichtes unter Biegelast .....	61
(6.29) Flächenträgheitsmoment $I_k$ je Einzelschicht mit Steinerschen Anteilen .....	62
(6.30) Biegesteifigkeit $EI$ in Gelenk- bzw. Bauteilbereich unter Berücksichtigung der Steinerschen Anteile .....	62
(7.1) Zyklische Biegeprüfung: Bedingung Betriebsfestigkeit .....	74
(7.2) Zyklische Biegeprüfung: Versagenskriterium .....	75
(8.1) Lineare Abhängigkeit von $\sigma_{b0}$ und $EI_0$ .....	98
(8.2) Lineare Abhängigkeit von $\sigma_{bD}$ und $EI_D$ .....	98
(8.3) Bestimmung der prozentualen Biegespannung $\sigma_{bD}/\sigma_{b0}$ bei Betriebsfestigkeit auf Basis von (8.2) .....	99
(8.4) Regressionsfunktion für die initiale Biegesteifigkeit $EI_0$ .....	100
(8.5) Regressionsfunktion für die prozentuale Betriebssteifigkeit $EI_D/EI_0$ .....	102
(8.6) Bestimmung der Betriebssteifigkeit $EI_D$ auf Basis von (8.5).....	102
(8.7) Regressionsfunktion für die prozentuale Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ .....	103
(8.8) Bestimmung der Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}$ auf Basis von (8.7) .....	103

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Beispiel einer doppelt gekrümmten Außenfassade mit komplexer innen liegender Verschattung: Kaufhaus Peek & Cloppenburg, Köln, Deutschland.....	1
Abb. 2.1	Starrkörper- und Nachgiebigkeitsmechanismen .....	5
Abb. 2.2	Substitution mechanischer Gelenke durch nachgiebige Mechanismen am Beispiel einer von AMP Inc. entwickelten Crimpzange .....	6
Abb. 2.3	Querschnittsdarstellung der Materialansätze zur Herstellung von FVK-Gelenkbauteilen .....	8
Abb. 2.4	Adaptive Fassadenverschattungen aus FVK.....	10
Abb. 3.1	Prinzipieller Aufbau eines FVK-Gelenkbauteils.....	13
Abb. 3.2	Arbeitsfelder entsprechend der vier aufgestellten Arbeitshypothesen.....	15
Abb. 4.1	Heißpress-Zyklus für Prüfkörperherstellung.....	21
Abb. 4.2	Schematische Darstellung der Prüfaufbauten (1).....	22
Abb. 4.3	Schematische Darstellung der Prüfaufbauten (2).....	23
Abb. 4.4	2-Punkt-Biegeprüfung eines Gelenkbauteils in Anlehnung an DIN 53121: 2014 [26] mit verschiedenen Durchbiegungen $s$ .....	24
Abb. 4.5	Exemplarisches Kraft-Weg-Diagramm für 2-Punkt-Biegeprüfung über zwei Lastspiele.....	25
Abb. 4.6	Schematische Darstellung der Längenänderung im Gelenkbereich eines Gelenkbauteils unter Annahme eines Versagens des GFK-Anteils im Hybridverbund .....	28
Abb. 4.7	Schematische Darstellung der Prüfaufbauten (3).....	30
Abb. 5.1	Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung verschiedener Fasermaterialien .....	35
Abb. 5.2	Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung verschiedener Matrixsysteme .....	36
Abb. 5.3	Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung ET222 mit/ohne Elastomerverstärkung ...	37
Abb. 5.4	Schematischer Laminataufbau des Gelenkbauteil-Prüfkörpers (Geometrie vor dem Pressprozess) für die Auswahl der Oberflächenkaschierung und Prüfung der Witterungsbeständigkeit.....	39
Abb. 5.5	Schematischer Laminataufbau des Gelenk- und Bauteilbereichs für die Ermittlung der Oberflächenkaschierung mit den untersuchten Folien (x).....	40
Abb. 5.6	Mikroskopieaufnahmen (Auflichtmikroskop) von in Schliffbildproben eingebetteten Dauerknickprüfkörpern.....	40
Abb. 5.7	Bestimmung der Foliendicke abhängig von Gelbwert und Deckkraft.....	41
Abb. 5.8	Gelbwertmessung und Zugprüfung von mit/ohne TPU ( $h = 0,3$ mm) bewitterten Laminaten.....	42
Abb. 5.9	Prüfkörper für T-Schälprüfung.....	44

Abb. 5.10	Mikroskopieaufnahme (Auflichtmikroskop) einer Schlifffbildprobe eines Schälprüfkörpers TPU-ET222.....	45
Abb. 5.11	Ergebnisse der T-Schälprüfung.....	45
Abb. 5.12	Exemplarisches Ergebnis von Verlustmodul $G''$ und -faktor $\tan\delta$ aus DMTA-Messung an den Gelenk- und Bauteilbereichen mit HHZ82 .....	47
Abb. 5.13	Ergebnisse der Brandprüfung.....	49
Abb. 5.14	Übersicht der in Kapitel 5 durchgeführten schrittweisen Materialanalyse .....	51
Abb. 5.15	Mikroskopieaufnahme einer Schlifffbildprobe eines Gelenkbauteils .....	52
Abb. 6.1	Schematischer Laminataufbau für die Berechnung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften.....	56
Abb. 6.2	Zugfestigkeiten $\sigma_Z$ für den Gelenk- und Bauteilbereich (rechnerisch ermittelt) abhängig vom textilen Flächengewicht $m_A$ im Gelenkbereich .....	59
Abb. 6.3	Resultierende Kräfte durch Anlegen eines Biegemoments $M_B$ an die parallel zur Querschnittsmitte verschobene neutrale Faser.....	60
Abb. 6.4	Dickenänderung der oben liegenden TPU- und HHZ99-Schicht des Prüfkörpers in der 3-Punkt-Biegeprüfung.....	62
Abb. 6.5	Gegenüberstellung rechnerisch und experimentell (3-Punkt-Biegeprüfung) ermittelter Werte der Biegesteifigkeit $EI$ .....	63
Abb. 6.6	Biegesteifigkeiten $EI$ für den Gelenk- und Bauteilbereich (rechnerisch ermittelt) mit/ohne Dickenkomprimierung der oberen TPU- und der HHZ99-Schicht .....	64
Abb. 6.7	Methodik zur analytischen Berechnung der Laminateneigenschaften des Hybridverbunds.....	65
Abb. 7.1	Gelenkbauteil-Prüfkörper für zyklische Biegeprüfung.....	68
Abb. 7.2	Schematische Darstellung (perspektivische Aufsicht) des zyklischen Biegeprüfstands.....	69
Abb. 7.3	Schematische Darstellung (Seitenansicht) des zyklischen Biegeprüfstands mit skizziertem Verlauf der Biegebewegung des Gelenkbauteil-Prüfkörpers .....	69
Abb. 7.4	Zyklischer Biegeprüfstand für die Prüfung von FVK-Gelenkbauteilen .....	70
Abb. 7.5	Laminataufbau der Prüfkörper zur Einstellung der Haltezeit .....	71
Abb. 7.6	Einstellung der Haltezeit für die Gelenkbauteil-Prüfkörper an den Relaxationspunkten des zyklischen Biegeprüfstands.....	71
Abb. 7.7	Schematische Darstellung der eingetragenen Momente und resultierenden Kräfte in der zyklischen Biegeprüfung .....	72
Abb. 7.8	Exemplarische Darstellung der Kenngrößen zur Bestimmung von Biegespannung $\sigma_b$ und Biegesteifigkeit $EI$ im ersten Lastspiels der zyklischen Biegeprüfung .....	73
Abb. 7.9	Schematische Darstellung der Bestimmung von Betriebsfestigkeit/-lastspiel und Bruchfestigkeit/-lastspiel in der zyklischen Biegeprüfung .....	74

Abb. 8.1	Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung mit Variation der Position von HHZ99 in Relation zur eingetragenen Kraft $F$ .....	78
Abb. 8.2	Schematische Darstellung der Gelenkbauteil-Prüfkörper für die Untersuchung der Gelenkbreite $b_G$ .....	80
Abb. 8.3	Mikroskopieaufnahme einer Schliffbildprobe eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit $b_G = 20$ mm .....	80
Abb. 8.4	Einspannung von Gelenkbauteil-Prüfkörpern in der 2-Punkt-Biegeprüfung..	80
Abb. 8.5	Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung mit unterschiedlichen Gelenkbreiten $b_G$ ..	81
Abb. 8.6	Schematische Darstellung der Gelenkbauteil-Prüfkörper für die Untersuchung der Übergangsbreite $b_U$ .....	82
Abb. 8.7	Mikroskopieaufnahme einer Schliffbildprobe eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit $b_G = 10$ mm und $b_U = 5$ mm.....	82
Abb. 8.8	Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung mit unterschiedlichen Übergangsbreiten $b_U$ (Einspannung mit HHZ99 auf der Druckseite).....	83
Abb. 8.9	Schematische Darstellung der Laminataufbauten der Gelenkbauteil-Prüfkörper (vor dem Pressprozess) für die Untersuchung des Steifigkeitsverhältnisses zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich .....	84
Abb. 8.10	Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung mit unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnissen zwischen dem Gelenk- und Bauteilbereich.....	85
Abb. 8.11	Schematische Darstellung des Laminataufbaus der Gelenkbauteil-Prüfkörper (vor dem Pressprozess) für die Untersuchung des Einflusses des Biege winkels auf die Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}$ .....	86
Abb. 8.12	Schematische Darstellung der Einspannung ( $0^\circ$ -Lage) des Gelenkbauteil-Prüfkörpers im zyklischen Biegeprüfstand mit der HHZ99-Schicht auf der Druckseite bei Biegebelastung .....	87
Abb. 8.13	Schematische Darstellung der untersuchten Einflussfaktoren .....	89
Abb. 8.14	Schematische Querschnittsdarstellung der Abstufung der ET222 Schichten mit einer Faserorientierung von $(0/90)^\circ$ $n_{ET222 (0/90)^\circ}$ im Übergangsbereich der Gelenkbauteil-Prüfkörper.....	91
Abb. 8.15	Ergebniskurve eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit Aufbau (1).....	92
Abb. 8.16	Gegenüberstellung rechnerisch ermittelte initiale Biegesteifigkeit $EI$ ohne bzw. mit Komprimierung der TPU- und HHZ99-Schicht (100 % bzw. 45 % Dicke) und initiale Biegesteifigkeit $EI_0$ resultierend aus der zyklischen Biegeprüfung.....	93
Abb. 8.17	Exemplarische Ergebniskurve eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit Aufbau (4) .....	95
Abb. 8.18	Übersicht des Aufbaus der Prüfkörper (1) bis (10) und Zuordnung zu den erfüllten Kriterien .....	96
Abb. 8.19	Gegenüberstellung rechnerisch ermittelte Zugfestigkeit (unbelastetes Laminat) $\sigma_z$ und nach der zyklischen Biegeprüfung ermittelte Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}$ .....	97
Abb. 8.20	Hauptfaktorendiagramme für initiale Biegesteifigkeit $EI_0$ .....	99

Abb. 8.21	Diagramme statistisch signifikanter Wechselwirkungen für $EI_0$ .....	100
Abb. 8.22	Hauptfaktorendiagramme für $EI_D/EI_0$ .....	101
Abb. 8.23	Diagramme statistisch signifikanter Wechselwirkungen für $EI_D/EI_0$ .....	101
Abb. 8.24	Hauptfaktorendiagramme für prozentuale Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ .....	102
Abb. 8.25	Diagramme statistisch signifikanter Wechselwirkungen für die prozentuale Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ .....	103
Abb. 8.26	Arbeitsflussdiagramm für die Ermittlung der Bauteilgeometrie eines Gelenkbauteils .....	104
Abb. 8.27	Schematische Darstellung des Laminataufbaus des Gelenkbauteil-Prüfkörpers (8A) .....	105
Abb. 8.28	Exemplarische Ergebniskurve eines Gelenkbauteil-Prüfkörpers mit Aufbau (8A) .....	106

# Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Untersuchte textile Flächengebilde .....	18
Tab. 4.2	Untersuchte Matrixsysteme .....	19
Tab. 4.3	Untersuchte Kaschiermaterialien .....	19
Tab. 5.1	Max. Biegekraft $F_{max}$ unter 2-Punkt-Biegung mit/ohne Elastomerschicht ....	38
Tab. 5.2	Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) der Materialien im Hybridverbund .....	47
Tab. 5.3	Ergebnisse 2-Punkt-Biegeprüfung (Biegesteifigkeit $EI$ und Biegespannung $\sigma_b$ des Gelenkbereichs mit HHZ99/HHZ82 .....	48
Tab. 6.1	Materialeigenschaften der Einzelschichten im Hybridverbund .....	54
Tab. 6.2	Prozentualer Anteil $F_P$ der Lastaufnahme in den Materialschichten des Gelenk- und Bauteilbereichs .....	57
Tab. 6.3	Maximale Kraftaufnahme $F_{max}$ je Materialschicht im Gelenk- und Bauteilbereich .....	58
Tab. 6.4	Maximal zulässige Kraft $F_{zul}$ in den Materialschichten des Gelenk- und Bauteilbereichs .....	58
Tab. 6.5	Gegenüberstellung rechnerisch und experimentell ermittelter Werte der Zugfestigkeit $\sigma_Z$ .....	59
Tab. 6.6	Gegenüberstellung rechnerisch und experimentell (3-Punkt-Biegeprüfung) ermittelter Werte der Biegesteifigkeit $EI$ .....	62
Tab. 6.7	Gegenüberstellung rechnerisch und experimentell (3-Punkt-Biegeprüfung) ermittelter Werte der Biegesteifigkeit $EI$ unter Berücksichtigung einer Komprimierung der HHZ99- und TPU-Schicht auf 45 % der ursprünglichen Dicke .....	64
Tab. 8.1	Einstellung des zyklischen Biegeprüfstands für die Prüfung des Biegewinkels .....	86
Tab. 8.2	Lastspiel $N_D$ in Abhängigkeit vom Biegewinkel $\alpha$ .....	87
Tab. 8.3	Biegespannungen und -steifigkeiten aus zyklischer Biegeprüfung abhängig vom maximalen Biegewinkel $\alpha$ .....	88
Tab. 8.4	Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}$ und prozentuale Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ in Abhängigkeit vom Biegewinkel $\alpha$ .....	88
Tab. 8.5	Versuchsplan zur Untersuchung der Auslegungskriterien von FVK-Gelenkbauteilen .....	90
Tab. 8.6	Einstellungen des zyklischen Biegeprüfstands zur Untersuchung der Auslegungskriterien .....	91
Tab. 8.7	Initiale Biegeeigenschaften $\sigma_{b0}$ und $EI$ der Prüfkörper (1) bis (10) .....	93
Tab. 8.8	Betriebsfestigkeitseigenschaften der Prüfkörper (1) bis (10) .....	95
Tab. 8.9	Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}$ und prozentuale Restzugfestigkeit $\sigma_{ZR}/\sigma_Z$ der Prüfkörperaufbauten (vgl. Tab. 8.5) mit Betriebsfestigkeit .....	97

Tab. 8.10	Gegenüberstellung prognostizierter Materialkennwerte des Gelenkbauteil-Prüfkörpers (8A) mit angepasster Bauteilgeometrie und experimentell ermittelter Materialkennwerte .....	106
-----------	--	-----



## Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] Abdelmohsen S, El-Dabaa R (2019) HMTM: Hygromorphic-Thermobimetal Composites as a Novel Approach to Enhance Passive Actuation of Adaptive Façades. In: Lee J-H (Hrsg) "Hello, Culture!", S 290–300
- [2] Abts G (2018) Einführung in die Kautschuktechnologie. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
- [3] Ashir M, Theiss C, Nocke A, Cherif C (2017) Analysis of the deformation speed of adaptive fiber reinforced plastics with variable hinged width. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 254(042003). doi:10.1088/1757-899X/254/4/042003
- [4] Ashir M, Nocke A, Theiss C, Cherif C (2017) Development of adaptive hinged fiber reinforced plastics based on shape memory alloys. Composite Structures (170):243–249. doi:10.1016/j.compstruct.2017.03.031
- [5] Ashir M, Hindahl J, Nocke A, Cherif C (2017) Development of adaptive pleated fiber reinforced plastic composites. Composites Science and Technology (148):27–34. doi:10.1016/j.compscitech.2017.05.016
- [6] Ashir M, Hindahl J, Nocke A, Sennewald C, Cherif C (2018) Development of adaptive pleated woven fabrics with shape memory alloys. Textile Research Journal (0(00)):1-12. doi:10.1177/0040517518792736
- [7] Ashir M, Nocke A, Cherif C (2019) Adaptive fiber-reinforced plastics based on open reed weaving and tailored fiber placement technology. Textile Research Journal:0040517519884578. doi:10.1177/0040517519884578
- [8] ASTM International (2013) Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites (ASTM D5528). doi:10.1520/D5528-13
- [9] Barozzi M, Lienhard J, Zanelli A, Monticelli C (2016) The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture. Procedia Engineering 155:275–284. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.029
- [10] Bedon C (2016) Review on the use of FRP Composites for Facades and Building Skins. American Journal of Engineering and Applied Sciences 9(3):713–723. doi:10.3844/ajeassp.2016.713.723
- [11] Bischoff M, Sachse R, Körner A, Westermeier AS, Born L, Poppinga S, Gresser GT, Speck T, Knippers J (2017) Modeling and analysis of the trapping mechanism of *Aldrovanda vesiculosa* as biomimetic inspiration for façade elements. In: International Association for Shell and Spatial Structures (Hrsg) Proceedings of the IASS Annual Symposia 2017. Interfaces: architecture.engineering.science, S 1–9
- [12] Born L, Körner A, Schieber G, Westermeier AS, Poppinga S, Sachse R, Bergmann P, Gresser GT, Milwich M, Knippers J, Betz O, Bischoff M, Speck T (2017) Fiber-Reinforced Plastics with Locally Adapted Stiffness for Bio-Inspired Hingeless, Deployable Architectural Systems. In: Herrmann AS (Hrsg) 21st Symposium on Composites, Bd 742. Trans Tech Publications, Zurich, S 689–696
- [13] Born L, Körner A, Mader A, Schieber G, Milwich M, Knippers J, Gresser GT (2019) Adaptive FRP Structures for Exterior Applications. Advanced Material Letters (10):913–918. doi:10.5185/amlett.2019.0029

- [14] Brancart S, Paduart A, Vergauwen A, Vandervaeren C, Laet L de, Temmerman N de (2017) Transformable structures: Materialising design for change. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics* 12(3):357–366. doi:10.2495/DNE-V12-N3-357-366
- [15] Branchenradar.com Marktanalyse GmbH (2019) Sonnenschutzsysteme in Deutschland 2019. <https://www.branchenradar.com/de/studien/bauelemente-und-technik/sonnenschutzsysteme-in-deutschland-2019/>. Zugegriffen: 23. Januar 2020
- [16] Brewer PR, Shorcott S, Raval RR (2012) Flexible Composite Hinge. Patentanmeldung offen (EP2682550 A1)
- [17] Chase VA, Scarpati TS (1993) All composite article of manufacture including first and second composite members joined by a composite hinge. Patent erloschen (US5350614A)
- [18] clauss markisen Projekt GmbH (2005) Kaufhaus Peek & Cloppenburg, Köln, Deutschland. Architekt: Renzo Piano Building Workshop Paris. [https://www.clauss-markisen.de/index.php?id=171&tx\\_wtgallery\\_pi1\[show\]=40190695&cHash=a3f00bd64e](https://www.clauss-markisen.de/index.php?id=171&tx_wtgallery_pi1[show]=40190695&cHash=a3f00bd64e). Zugegriffen: 05. Mai 2020
- [19] Deutsches Institut für Normung (1980) Beschreibung der Vergilbung von nahezu weißen oder nahezu farblosen Materialien (DIN 6167). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/1118789
- [20] Deutsches Institut für Normung (1997) Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (DIN EN ISO 527-4). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/7360910
- [21] Deutsches Institut für Normung (1997) Luft- und Raumfahrt - Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe. Unidirektionale Lamine - Biegeprüfung parallel zur Faserrichtung (DIN EN 2562). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/7253929
- [22] Deutsches Institut für Normung (1998) Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 1: Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen (DIN 4102-1). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/7505142
- [23] Deutsches Institut für Normung (1998) Faserverstärkte Kunststoffe. Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve des Schubmoduls in der Lagenebene (DIN EN ISO 14129). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/7433963
- [24] Deutsches Institut für Normung (2006) Prüfung von Kunstleder und ähnlichen Flächengebilden. Dauer-Knickversuch (DIN 53359). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/9761385
- [25] Deutsches Institut für Normung (2010) Außenwandbekleidungen, hinterlüftet. Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze (DIN 18516-1). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/1633660
- [26] Deutsches Institut für Normung (2010) Klebstoffe. T-Schälprüfung für geklebte Verbindungen aus flexiblen Füge-teilen (DIN EN ISO 11339). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/1623860

- [27] Deutsches Institut für Normung (2011) Faserverstärkte Kunststoffe. Bestimmung der Biegeeigenschaften (DIN EN ISO 14125). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/1753441
- [28] Deutsches Institut für Normung (2011) Textilien. Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung (DIN EN ISO 139). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/1762430
- [29] Deutsches Institut für Normung (2014) Prüfung von Papier, Karton und Pappe. Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode (DIN 53121). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/2152877
- [30] Deutsches Institut für Normung (2014) Abschlüsse innen. Leistungs- und Sicherheitsanforderungen (DIN EN 13120). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/2060571
- [31] Deutsches Institut für Normung (2015) Markisen. Leistungs- und Sicherheitsanforderungen (DIN EN 13561). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/2319063
- [32] Deutsches Institut für Normung (2016) Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten. Teil 3: UV-Leuchtstofflampen (DIN EN ISO 4892-3). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/2474527
- [33] Deutsches Institut für Normung (2016) Schwingfestigkeitsversuch. Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile (DIN 50100). doi:10.31030/2580844
- [34] Deutsches Institut für Normung (2019) Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften. Teil 1: Allgemeine Grundlagen (DIN EN ISO 6721-1). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/3072094
- [35] Deutsches Institut für Normung (2019) Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften. Teil 2: Torsionspendel-Verfahren (DIN EN ISO 6721-2). Beuth Verlag GmbH, Berlin. doi:10.31030/3072095
- [36] Dominighaus H (2005) Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 6. Aufl. VDI-Buch. Springer, Berlin
- [37] Douthe C, Baverel O, Caron J-F (2007) Gridshell in Composite Materials: Towards Wide Span Shelters. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 48(3):175–180
- [38] Ehrenstein GW (2006) Faserverbund-Kunststoffe. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
- [39] Ehrenstein GW (2011) Polymer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
- [40] Finckenstein KGF, Lehn J, Schellhaas H, Wegmann H (2006) Arbeitsbuch Mathematik für Ingenieure. Band II: Differentialgleichungen, Funktionentheorie, Numerik und Statistik, 3. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- [41] Flemming M, Ziegmann G, Roth S (1996) Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- [42] Flemming M, Roth S (2003) Faserverbundbauweisen Eigenschaften. mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte, 1. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

- [43] Habenicht G (2016) Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
- [44] Hanaor A, Levy R (2001) Evaluation of Deployable Structures for Space Enclosures. *International Journal of Space Structures* 16(4):211–229. doi:10.1260/026635101760832172
- [45] Hanke U, Modler K-H, Lin S, Modler N, Zichner M, Lucas P (2011) Synthesis strategy for a mechanism based test bench for compliant structures 13th World Congress in Mechanism and Machine Science
- [46] Hanke U, Modler K-H, Zichner M, Hornig A, Modler N (2015) Compliant Mechanisms with Distributed Stiffness-Synthesis and Application Proceedings of the 14th International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science Worlds Congress 2015, Bd 4. Curran Associates, Red Hook, NY, USA, S 2124–2130
- [47] Hegger M, Fuchs M, Stark T, Zeumer M (2017) Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden anhand von 20 Beispielprojekten als konkrete Handlungslinie und Arbeitshilfe für Planer. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens, gefördert unter AZ 24084-25 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)
- [48] Hegner H-D (2010) Nachhaltiges Bauen in Deutschland - Bewertungssystem des Bundes für Büro- und Verwaltungsbauten. *Stahlbau* 79(6):407–417. doi:10.1002/stab.201001335
- [49] Henning F, Moeller E (2011) Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Hanser eLibrary. Hanser, München
- [50] Her I (1986) Methodology for Compliant Mechanism Design. Dissertation. ProQuest Dissertations Publishing, West Lafayette, Indiana, United States of America
- [51] Howell LL (2001) Compliant mechanisms. Wiley, New York
- [52] Hufenbach W, Gude M (2002) Analysis and optimisation of multistable composites under residual stresses. *Composite Structures* 55(3):319–327. doi:10.1016/S0263-8223(01)00153-2
- [53] Hufenbach WA, Gude M, Adam F, Modler N, Heber T, Renner O, Körner I, Weck D (2011) Experimental investigation of composite-based compliant structures. *Kompozyty* (11:3):187–191
- [54] Hutchins M (2015) High Performance Dynamic Shading Solutions For Energy Efficiency And Comfort In Buildings. <https://aercnet.org/wp-content/uploads/2015/12/ES-SO-Study-2015.pdf>. Zugegriffen: 23. Januar 2020
- [55] Joseph H Saleh, Daniel E Hastings, Dava J Newman (2003) Flexibility in system design and implications for aerospace systems. *Acta Astronautica* 53(12):927–944. doi:10.1016/S0094-5765(02)00241-2
- [56] Kaiser W (2016) Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung. Hanser, München
- [57] Knippers Helbig GmbH (2005) Kaufhaus Peek & Cloppenburg, Köln, Deutschland. Architekt: Renzo Piano Building Workshop Paris. <https://www.knippershelbig.com/de/projekte/kaufhaus-peek-cloppenburg#>. Zugegriffen: 05. Mai 2020

- [58] Knippers J, Scheible F, Oppe M, Jungjohann H (2012) Bio-inspired Kinetic GFRP-façade for the Thematic Pavilion of the EXPO 2012 in Yeosu Proceedings of the IASS-APCS Symposium 2012 Seoul (Korea). From Spatial Structures to Space Structures
- [59] Knippers J, Speck T (2012) Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspiration & Biomimetics* 7(1):15002
- [60] Kondolf MG (1994) Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning* 28(2-3):225–243. doi:10.1016/0169-2046(94)90010-8
- [61] Körner A, Knippers J, Eshraghi V, Zolfaghari A, Asrar Haghighi L, Kalantari M (2018) Arch(k)kinetic - Curved-line folding for elastic, adaptive building envelopes. In: International Association for Shell and Spatial Structures (Hrsg) Proceedings of IASS Annual Symposia. Education of architecture and technology, Bd 8, S 1–8
- [62] Körner A, Born L, Mader A, Sachse R, Saffarian S, Westermeier AS, Poppinga S, Bischoff M, Gresser GT, Milwich M, Speck T, Knippers J (2018) Flectofold—a biomimetic compliant shading device for complex free form facades. *Smart Materials and Structures* (27). doi:10.1088/1361-665X/aa9c2f
- [63] Kutscheid T (1998) Gelenk für Anwendungen in der Raumfahrt. Patentanmeldung zurückgezogen (EP0875647 A1)
- [64] Lanza Volpe A (2018) Building Optimization: The Adaptive Façade. *Advanced Materials Research* 1149:64–75. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1149.64
- [65] Lienhard J, Poppinga S, Schleicher S, Masselter T, Speck T, Knippers J (2009) Abstraction of plant movements for deployable structures in architecture. In: Thibaut B (Hrsg) Proceedings of the 6th Plant Biomechanics Conference, S 389–397
- [66] Lienhard J, Schleicher S, Poppinga S, Masselter T, Milwich M, Speck T, Knippers J (2011) Flectofin. A hingeless flapping mechanism inspired by nature. *Bioinspiration & Biomimetics* 6(4):45001
- [67] Lienhard J (2013) Wandelbarer Leichtbau in der Architektur - Biegsame Flächentragwerke auf der Grundlage bionischer Prinzipien. Schlussbericht BMBF Verbundvorhaben ITKE/PBG/ITV/cm/CG-Tec/K.-H. Ing. Förderkennzeichen 01RB0806. Laufzeit 03/2009 - 06/2013. doi:10.2314/GBV:828042217
- [68] Lienhard J (2014) Bending-active structures. Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. Dissertation. Forschungsberichte aus dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart, Stuttgart
- [69] Lienhard J, Schleicher S, Knippers J (2015) Bio-inspired, Flexible Structures and Materials. In: Pacheco Torgal F, Labrincha JA, Diamanti MV, Yu C-P, Lee HK (Hrsg) *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. Springer International Publishing, Cham, S 275–296
- [70] Livingston-Peters A, Gabriel M (2015) Composite structure with a flexible section forming a hinge. Patent aktiv (US9205629 B2)
- [71] Lobontiu N (2003) *Compliant mechanisms. Design of flexure hinges*. CRC-Press, Boca Raton, Fla. [u.a.]

- [72] Loonen RCGM, Trčka M, Cóstola D, Hensen JLM (2013) Climate adaptive building shells. State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25:483–493. doi:10.1016/j.rser.2013.04.016
- [73] Loonen RCGM, Singaravel S, Trčka M, Cóstola D, Hensen JLM (2014) Simulation-based support for product development of innovative building envelope components. *Automation in Construction* 45:86–95. doi:10.1016/j.autcon.2014.05.008
- [74] Loonen RCGM (2015) Bio-inspired Adaptive Building Skins. In: Pacheco Torgal F, Labrincha JA, Diamanti MV, Yu C-P, Lee HK (Hrsg) *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. Springer International Publishing, Cham, S 115–134
- [75] Loonen RCGM, Favoino F, Hensen JLM, Overend M (2017) Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation* 10(2):205–223. doi:10.1080/19401493.2016.1152303
- [76] Mader A, Born L, Körner A, Schieber G, Masset P-A, Milwich M, Gresser GT, Knippers J (2019) Bio-inspired integrated pneumatic actuation for compliant fiber-reinforced plastics. *Composite Structures*:111558. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111558
- [77] Malia MJ, Kaplun B, Consalvi D (2015) Composite Live Hinge. Patentanmeldung offen (US2015/0040349 A1)
- [78] Malia MJ, Kaplun B, Consalvi D (2019) Enhanced Composite Live Hinge. Patentanmeldung offen (US2019/0264482 A1)
- [79] Masini A, Pasini N, Sario L de (2014) Hinge for composite materials and process for its manufacture. Patent aktiv (US2014/0007377 A1)
- [80] Midha A, Norton TW, Howell LL (1994) On the Nomenclature, Classification, and Abstractions of Compliant Mechanisms. *Journal of Mechanical Design* 116(1):270–279. doi:10.1115/1.2919358
- [81] Modler N, Hufenbach W, Renner O, Knötig T, Modler K-H, Lin S (2010) Auslegung und Gestaltung von Nachgiebigkeitsmechanismen. *Layout and Design of Compliant Mechanisms Bewegungstechnik 2010. Koppelgetriebe, Kurvengetriebe und geregelte Antriebe im Maschinen-, Fahrzeug-, und Gerätebau ; Nürnberg, 5. und 6. Oktober 2010, Bd 2116*. VDI, Düsseldorf, S 177–190
- [82] Modler N, Modler K-H, Hufenbach WA, Jaschinski J, Zichner M, Hanke U, Ehlig J (2013) Optimization of a Test Bench for Testing Compliant Elements Under Shear-Force-Free Bending Load. *Procedia Materials Science* 2:130–136. doi:10.1016/j.mspro.2013.02.015
- [83] Nachtigall W, Pohl G (2013) Trag- und Hüllstrukturen in der Biologie als Ideengeber für Bauwerk. In: Nachtigall W, Pohl G (Hrsg) *Bau-Bionik. Natur - Analogien - Technik*, 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S 101–138
- [84] Neitzel M, Mitschang P, Breuer UP (Hrsg) (2014) *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 2. Aufl. Hanser, München

- [85] Otto F (1972) Wandelbare Dächer. Historische Zusammenhänge. Dokumentation wandelbarer Konstruktionen, Konstruktionsanalyse mit Grundlagen der Geometrie, der Form und der Bewegungen. Weiterentwicklung wandelbarer Dächer als Massiv- oder Membrankonstruktionen. IL 5. Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart
- [86] Poppinga S, Lienhard J, Masselter T, Schleicher S, Knippers J, Speck T (2010) Plant movements as concept generators for deployable systems in architecture. In: Lim CT, Goh JCH (Hrsg) IFMBE Proceedings. 6th World Congress of Biomechanics (WCB 2010). In Conjunction with 14th International Conference on Biomedical Engineering (ICBME) and 5th Asia Pacific Conference on Biomechanics (APBiomech). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S 403–409
- [87] Poppinga S, Körner A, Sachse R, Born L, Westermeier AS, Hesse L, Knippers J, Bischoff M, Gresser GT, Speck T (2016) Compliant Mechanisms in Plants and Architecture. In: Knippers J, Nickel KG, Speck T (Hrsg) Biomimetic Research for Architecture and Building Construction. Biological Design and Integrative Structures. Springer International Publishing, Cham, S 169–193
- [88] Priegelmeir W, Heilmeyer G (2007) Joint. Patent aktiv (EP1738895 B1)
- [89] Röthemeyer F, Sommer F (2013) Kautschuk Technologie. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
- [90] Sadeghi SH, Gharemahmudli S, Kheirfam H, Khaledi Darvishan A, Kiani Harchegani M, Saeidi P, Gholami L, Vafakhah M (2018) Effects of type, level and time of sand and gravel mining on particle size distributions of suspended sediment. *International Soil and Water Conservation Research* 6(2):184–193. doi:10.1016/j.iswcr.2018.01.005
- [91] Saffarian S, Born L, Körner A, Mader A, Westermeier AS, Poppinga S, Milwich M, Gresser GT, Speck T, Knippers J (2019) From Pure Research To Biomimetic Products: The Flectofold Facade Shading Device. In: Knippers J, Schmid Ulrich, Speck T (Hrsg) Biomimetics for Architecture, Learning from Nature. Birkhäuser, Berlin, Basel, S 42–51
- [92] Schaube J, Zahn J, Plenk F (2012) Verbundbauteile aus wärmehärtenden Harzen und Elastomeren. Patent aktiv (EP2419272 B1)
- [93] Schaube J, Plenk F (2013) Faserverstärktes Verbundbauteil sowie Verfahren zur Herstellung eines solchen Verbundbauteils (WO2013/045114 A2)
- [94] Schieber G, Born L, Bergmann P, Körner A, Mader A, Saffarian S, Betz O, Milwich M, Gresser GT, Knippers J (2017) Hindwings of insects as concept generator for hingeless foldable shading systems. *Bioinspiration & Biomimetics* 13(1):16012. doi:10.1088/1748-3190/aa979c
- [95] Schlaich J, Knippers J (1999) Dreifeld-Klappbrücke Kiel-Hörn. Three-span-bascule bridge Kiel-Hörn. *Der Bauingenieur* 74(5):213–217
- [96] Schlaich M (2004) Aktive und wandelbare Ingenieurbauten. *Stahlbau* 73(12):1001–1009. doi:10.1002/stab.200490233
- [97] Schleicher S, Lienhard J, Poppinga S, Masselter T, Speck T, Knippers J (2011) Adaptive façade shading systems inspired by natural elastic kinematics Proceedings of the International Conference on Adaptive Architecture

- [98] Schleicher S, Lienhard J, Poppinga S, Masselter T, Speck T, Knippers J (2011) Bio-inspired kinematics of adaptive shading systems for free form facades Proceedings of the IABSE-IASS Symposium. Taller Longer Lighter, Bd 9
- [99] Schleicher S, Lienhard J, Poppinga S, Speck T, Knippers J (2015) A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. *Computer-Aided Design* 60:105–117. doi:10.1016/j.cad.2014.01.005
- [100] Schleicher S (2015) Bio-inspired compliant mechanisms for architectural design. Transferring bending and folding principles of plant leaves to flexible kinetic structures. Dissertation. Forschungsberichte aus dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart, Stuttgart
- [101] Schürmann H (2007) *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2. Aufl. Springer Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Deutschland
- [102] Siebertz K, van Bebber D, Hochkirchen T (2017) *Statistische Versuchsplanung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- [103] Simitjes GJ, Hodges DH (2006) *Fundamentals of structural stability*. Butterworth-Heinemann, Burlington, MA
- [104] Speck T, Knippers J, Speck O (2015) Self-X Materials and Structures in Nature and Technology. Bio-inspiration as a Driving Force for Technical Innovation. *Architectural Design* 85(5):34–39
- [105] Standaert P (2006) Energy Savings and CO2 Reduction Potential From Solar Shading Systems and Shutters in the EU-25. <http://bvst.at/images/pdfs/ESCORP-EU25.pdf>. Zugegriffen: 23. Januar 2020
- [106] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019) *World Population Prospects 2019*. Online Edition, 1. Aufl
- [107] Verein Deutscher Ingenieure (1993) *Getriebetechnische Grundlagen. Begriffsbestimmungen der Getriebe (VDI 2127)*
- [108] Vielsack F, Schaube J, Zahn J, Plenk F (2013) Verbundbauteil aus thermoplastischem Kunststoff und Elastomeren sowie Verfahren zur Herstellung eines solchen Verbundbauteils (WO2013/045087 A1)
- [109] Zichner M (2018) *Mechanismenelemente mit lokal angepasster Nachgiebigkeit*. Dissertation