



# TU Clausthal

Technische Universität Clausthal  
Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

## Masterarbeit

---

Strukturmechanische und prozesstechnische Bewertung von natur-  
und kohlenstofffaserverstärkten Hybridverbunden

---

Cedric Tschentscher  
Matrikelnummer: 478298

Clausthal-Zellerfeld, den 21.05.2023

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach  
Zweitgutachter: Dr. sc. nat. Leif Steuernagel



# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die folgende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, wurden als solche kenntlich gemacht. Zusätzlich versichere ich, dass die Arbeit von mir in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsstelle im Sinne von §11 Absatz 5 lit. b) der Allgemeinen Prüfungsordnung vorgelegt wurde.

Ich erkläre mich ebenfalls damit einverstanden, dass diese Arbeit in der Instituts- und/oder der Universitätsbibliothek ausgelegt und zur Einsichtnahme aufbewahrt werden darf.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

# Zusammenfassung

Naturfasern haben durch ihre erhöhte Permeabilität im Vergleich zu den Kohlefasern das Potential als Fließunterstützung in einem Infusionsprozess für Hybridfaserverbunde verwendet zu werden.

In dieser Arbeit werden die mechanischen Eigenschaften von natur- und kohlefaser-verstärkten Hybridverbunden anhand ihrer Ingenieurskonstanten näher untersucht und mit berechneten Werten über die klassische Laminattheorie verglichen. Außerdem wird der Einfluss einer Vorkompaktierung der Naturfasern auf die Hybridverbunde betrachtet. Die mechanischen Kennwerte werden im Zusammenhang mit den Infusionszeiten, welche durch die Naturfasern verringert werden soll, bewertet.

Je nach Belastung sind unterschiedliche Verringerungen der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum Kohlefaserlaminat festzustellen, sodass die Anwendung je nach Belastungsfall für ein Bauteil betrachtet werden muss. Dem steht eine deutliche Verkürzung der Infusionszeit durch die Naturfasern gegenüber. Eine Vorkompaktierung ergibt im Rahmen der Hybridfaserverbunde keinen Sinn, da die mechanischen Eigenschaften nicht nennenswert gesteigert werden können und sich die Zeiteinsparung bei der Infusionszeit verringert.

Das nicht-lineare Materialverhalten der Naturfasern erschwert eine Vorhersage der Materialkennwerte über die klassische Laminattheorie.

Schlagworte: Hybridfaserverbunde, Strukturmechanik, Vacuum Assisted Resin Infusion, mechanische Eigenschaften, Kompaktierung



# Abstract

Due to their increased permeability compared to carbon fibers, natural fibers have the potential to be used as flow support in an infusion process for hybrid fiber composites.

In this work, the mechanical properties of natural and carbon fiber reinforced hybrid composites are investigated in more detail using their engineering constants and compared with values calculated using classical laminate theory. In addition, the influence of pre-compaction of the natural fibers on the hybrid composites is considered. The mechanical properties are evaluated in relation to the infusion times that the natural fibers are expected to reduce.

Depending on the load, different reductions of the mechanical properties are observed compared to the carbon fiber laminate, so that the application has to be considered depending on the load case of a component. On the other hand, the natural fibers significantly reduce the infusion time. In the context of hybrid fiber composites, pre-compacting is not useful as it does not significantly improve the mechanical properties and reduces the infusion time.

The nonlinear material behavior of natural fibers makes it difficult to predict material properties using classical laminate theory.

**Keywords:** Hybrid fibre composites, structural mechanics, Vacuum Assisted Resin Infusion, mechanical properties, compaction

# Inhaltsverzeichnis

## Seite

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| Abkürzungen und Symbole                                         | I         |
| Abbildungsverzeichnis                                           | III       |
| Tabellenverzeichnis                                             | V         |
| <b>1 Einleitung</b>                                             | <b>1</b>  |
| <b>2 Forschungsstand und theoretische Grundlagen</b>            | <b>2</b>  |
| 2.1 Faserkunststoffverbunde . . . . .                           | 2         |
| 2.2 Faserverstärkungen . . . . .                                | 2         |
| 2.2.1 Kohlefaser . . . . .                                      | 2         |
| 2.2.2 Flachsfaser . . . . .                                     | 3         |
| 2.3 Epoxid Matrix . . . . .                                     | 4         |
| 2.4 Faservolumengehalt . . . . .                                | 4         |
| 2.5 Hybridfaserverbunde . . . . .                               | 5         |
| 2.6 Strukturmechanik der Faserverbunde . . . . .                | 6         |
| 2.6.1 Mischungsregel . . . . .                                  | 6         |
| 2.6.2 Klassische Laminattheorie . . . . .                       | 7         |
| 2.6.3 Bruchkriterium . . . . .                                  | 12        |
| <b>3 Zielsetzung und Konzept der Arbeit</b>                     | <b>13</b> |
| <b>4 Material und Methoden</b>                                  | <b>14</b> |
| 4.1 Probekörperherstellung mittels Infusionsverfahren . . . . . | 14        |
| 4.1.1 Durchführung des VARI-Verfahrens . . . . .                | 15        |
| 4.2 Kompaktierung der Naturfaserlagen . . . . .                 | 16        |
| 4.3 Prüfmethoden . . . . .                                      | 16        |
| 4.3.1 Ermittlung des Schubmoduls . . . . .                      | 16        |
| 4.3.2 Zugprüfung . . . . .                                      | 18        |
| 4.3.3 Garnzugprüfung . . . . .                                  | 19        |
| 4.3.4 Druckfestigkeit . . . . .                                 | 20        |
| 4.3.5 Drei-Punkt-Biegung . . . . .                              | 21        |
| 4.3.6 Dynamisch mechanische Analyse . . . . .                   | 23        |
| 4.4 Laminatberechnungsprogramm eLamX . . . . .                  | 23        |

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>Messergebnisse</b>                                                   | <b>24</b> |
| 5.1      | Faservolumengehalt . . . . .                                            | 24        |
| 5.2      | Zugeigenschaften . . . . .                                              | 25        |
| 5.2.1    | Garnzugversuch . . . . .                                                | 25        |
| 5.2.2    | Auswirkungen von Luftblasen innerhalb des Laminats . . . . .            | 26        |
| 5.2.3    | E-Modul . . . . .                                                       | 28        |
| 5.2.4    | Querkontraktionszahl . . . . .                                          | 31        |
| 5.2.5    | Zugfestigkeit . . . . .                                                 | 34        |
| 5.3      | Schubmodul . . . . .                                                    | 37        |
| 5.4      | Druckfestigkeit . . . . .                                               | 37        |
| 5.5      | Drei-Punkt-Biegung . . . . .                                            | 40        |
| 5.5.1    | Einfluss der Position der Naturfaserlagen . . . . .                     | 40        |
| 5.5.2    | Einfluss der Kompaktierung . . . . .                                    | 44        |
| 5.6      | Dynamisch mechanische Analyse . . . . .                                 | 49        |
| 5.6.1    | Einfluss der Position der Naturfaserlagen . . . . .                     | 49        |
| 5.6.2    | Einfluss der Kompaktierung . . . . .                                    | 51        |
| 5.7      | Infusionsdauer . . . . .                                                | 53        |
| <b>6</b> | <b>Auswertung und Diskussion</b>                                        | <b>55</b> |
| 6.1      | Einfluss der Kompaktierung auf die mechanischen Eigenschaften . . . . . | 55        |
| 6.2      | Naturfasern als Fließunterstützung . . . . .                            | 55        |
| 6.3      | Strukturmechanische Bewertung . . . . .                                 | 56        |
| 6.3.1    | Mischungsregel . . . . .                                                | 56        |
| 6.3.2    | Ingenieurskonstanten . . . . .                                          | 59        |
| 6.3.3    | Spannungs- und Dehnungsverteilung innerhalb eines Laminats . . . . .    | 63        |
| 6.3.4    | Versagensanalyse mittels Bruchkriterium . . . . .                       | 65        |
| <b>7</b> | <b>Fehlerdiskussion</b>                                                 | <b>67</b> |
| 7.1      | Probenpräparation . . . . .                                             | 67        |
| 7.2      | Druckversuch . . . . .                                                  | 67        |
| 7.3      | Zugversuch . . . . .                                                    | 68        |
| 7.4      | Garnzugversuch . . . . .                                                | 70        |
| 7.5      | Schubversuch . . . . .                                                  | 71        |
| 7.6      | Klassische Laminattheorie . . . . .                                     | 71        |
| 7.7      | Allgemein . . . . .                                                     | 71        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Fazit</b>                                        | <b>73</b> |
| <b>9</b> | <b>Ausblick</b>                                                         | <b>74</b> |

# Abkürzungen und Symbole

## Abkürzungen

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
| CF   | Kohlefaser                       |
| CFK  | kohlefaserverstärkter Kunststoff |
| DIN  | Deutsches Institut für Normung   |
| DMA  | Dynamisch mechanische Analyse    |
| FVG  | Faservolumengehalt               |
| NF   | Naturfaser                       |
| NFK  | naturfaserverstärkter Kunststoff |
| Ref  | Referenz                         |
| RTM  | Resin Transfer Moulding          |
| UD   | Unidirektional                   |
| VARI | Vacuum Assisted Resin Infusion   |

## Symbole

|               |                            |
|---------------|----------------------------|
| $A$           | Fläche                     |
| $b$           | Breite                     |
| $d$           | Dicke des Laminats         |
| $E$           | E-Modul                    |
| $F$           | Kraft                      |
| $G$           | Schubmodul                 |
| $k$           | Lagenreferenz              |
| $L$           | Auflagerabstand            |
| $LZ$          | Lagenanzahl                |
| $m$           | Biegemoment                |
| $M_A$         | Flächengewicht             |
| $n$           | Normalkraft                |
| $Q$           | Steifigkeit                |
| $r$           | Radius                     |
| $R$           | Festigkeit                 |
| $R^2$         | Bestimmtheitsmaß           |
| $s$           | Fließweglänge              |
| $t$           | Zeit                       |
| $z$           | Abstand zur Bezugsfläche   |
| $\gamma$      | Schubdehnung               |
| $\varepsilon$ | Dehnung                    |
| $\kappa$      | Krümmung                   |
| $\nu$         | Querkontraktionszahl       |
| $\rho$        | Dichte                     |
| $\sigma$      | Mechanische Normalspannung |
| $\tau$        | Mechanische Schubspannung  |
| $\varphi$     | Faservolumengehalt         |

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                                                                                |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Garnhaarigkeit . . . . .                                                                                                                                                       | 3  |
| 2.2  | Parallelschaltung der Steifigkeiten von Faser und Matrix [11] . . . . .                                                                                                        | 7  |
| 2.3  | Festlegung der Mittelebene als Bezugsfläche und der Schichtnummerierung                                                                                                        | 10 |
| 3.1  | Verwendete Konfigurationen . . . . .                                                                                                                                           | 13 |
| 4.1  | Schema des VARI Verfahrens [6] . . . . .                                                                                                                                       | 14 |
| 4.2  | VARI-Aufbau während der Infusion . . . . .                                                                                                                                     | 15 |
| 4.3  | Aufbau zur Messung des Schubmoduls . . . . .                                                                                                                                   | 17 |
| 4.4  | Schubprobe mit Messmuster . . . . .                                                                                                                                            | 17 |
| 4.5  | Messapparatur mit Kamerasystem . . . . .                                                                                                                                       | 18 |
| 4.6  | Bereich der durchgeführten Bildkorrelation . . . . .                                                                                                                           | 19 |
| 4.7  | Aufbau des Garnzugversuchs . . . . .                                                                                                                                           | 20 |
| 4.8  | Aufbau zur Bestimmung der Druckfestigkeit . . . . .                                                                                                                            | 21 |
| 4.9  | Normal- und Schubspannungsverlauf über die Dicke einer Biegeprobe, angepasst nach [1] . . . . .                                                                                | 21 |
| 4.10 | Aufbau der Drei-Punkt-Biegung . . . . .                                                                                                                                        | 22 |
| 5.1  | Faservolumenanteile . . . . .                                                                                                                                                  | 25 |
| 5.2  | Garnfestigkeit . . . . .                                                                                                                                                       | 26 |
| 5.3  | Naturfaserlamine links mit und rechts ohne Luftblasen . . . . .                                                                                                                | 27 |
| 5.4  | Vergleich beider Lamine . . . . .                                                                                                                                              | 27 |
| 5.5  | E-Moduli in Faserrichtung . . . . .                                                                                                                                            | 28 |
| 5.6  | Längsdehnungsverteilungen: links das Kohlefaserlaminat, mittig das Naturfaserlaminat, rechts das asymmetrische Hybridlaminat mit beiden Naturfasernlagen außen . . . . .       | 29 |
| 5.7  | E-Moduli quer zur Faserrichtung . . . . .                                                                                                                                      | 30 |
| 5.8  | Querkontraktionszahlen $\nu_{12}$ . . . . .                                                                                                                                    | 31 |
| 5.9  | Querdehnungsverteilung: links das Kohlefaserlaminat, mittig das Naturfaserlaminat, rechts das symmetrische Hybridlaminat mit den Naturfasernlagen als äußerste Lagen . . . . . | 32 |
| 5.10 | Querkontraktionszahlen $\nu_{21}$ . . . . .                                                                                                                                    | 33 |
| 5.11 | Zugfestigkeiten in Faserrichtungen . . . . .                                                                                                                                   | 34 |
| 5.12 | Bruchbild eines reinen Naturfaserverbands nach einem Zugversuch in Faserrichtung . . . . .                                                                                     | 35 |
| 5.13 | Bruchbild eines Hybridverbands nach einem Zugversuch in Faserrichtung .                                                                                                        | 35 |
| 5.14 | Zugfestigkeiten quer zur Faserrichtung . . . . .                                                                                                                               | 36 |
| 5.15 | Schubmodul der Lamine . . . . .                                                                                                                                                | 37 |
| 5.16 | Druckfestigkeit . . . . .                                                                                                                                                      | 38 |

|      |                                                                                                                                         |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.17 | Bruchbilder der Druckprüfung . . . . .                                                                                                  | 39 |
| 5.18 | Mechanismus der Entstehung einer Knickzone [1] . . . . .                                                                                | 39 |
| 5.19 | Biegemodul mit Fokus auf die Position der Naturfaserlagen . . . . .                                                                     | 40 |
| 5.20 | Bruchdehnung mit Fokus auf die Position der Naturfaserlagen . . . . .                                                                   | 41 |
| 5.21 | Biegefestigkeit mit Fokus auf die Position der Naturfaserlagen . . . . .                                                                | 42 |
| 5.22 | Bruchbilder der Biegeprüfung des asymmetrischen Laminataufbaus . . . . .                                                                | 43 |
| 5.23 | Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeprüfung mit Fokus auf die Positi-<br>on der Naturfaserlagen . . . . .                              | 44 |
| 5.24 | Biegemodul mit Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung . . . . .                                                                       | 45 |
| 5.25 | Bruchdehnung mit Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung . . . . .                                                                     | 46 |
| 5.26 | Probenvergleich: unten vorkompaktiert, oben unkompaktiert . . . . .                                                                     | 46 |
| 5.27 | Biegefestigkeit mit Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung . . . . .                                                                  | 47 |
| 5.28 | Bruchbilder . . . . .                                                                                                                   | 47 |
| 5.29 | Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeprüfung mit Fokus auf den Ein-<br>fluss der Kompaktierung . . . . .                                | 48 |
| 5.30 | Speichermodul mit dem Fokus auf die Position der Naturfaserlagen . . . . .                                                              | 49 |
| 5.31 | Verlustmodul mit dem Fokus auf die Position der Naturfaserlagen . . . . .                                                               | 50 |
| 5.32 | Speichermodul mit dem Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung . . . . .                                                                | 51 |
| 5.33 | Verlustmodul mit dem Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung . . . . .                                                                 | 52 |
| 5.34 | Fließweglänge in Abhängigkeit der Zeit . . . . .                                                                                        | 53 |
| 6.1  | Fließfronten der unterschiedlichen Laminataufbauten . . . . .                                                                           | 56 |
| 6.2  | Resultierende Verformungen durch die B-Matrix [25] . . . . .                                                                            | 62 |
| 6.3  | Links: Krümmung des asymmetrischen Laminats, rechts: als Vergleich die<br>symmetrische Referenz . . . . .                               | 62 |
| 6.4  | Dehnungs- und Spannungsverteilung innerhalb des asymmetrischen Hybrid-<br>verbunds mit den Naturfaserlagen auf der Außenseite . . . . . | 63 |
| 6.5  | Dehnungs- und Spannungsverteilung innerhalb des asymmetrischen Hybrid-<br>verbunds mit den Kohlefaserlagen auf der Außenseite . . . . . | 64 |
| 6.6  | Spannungsverteilungen innerhalb der symmetrischen Hybridverbunde . . . . .                                                              | 65 |
| 7.1  | Klebfestigkeit in Abhängigkeit der Klebschichtdicke [10] . . . . .                                                                      | 68 |
| 7.2  | Bruchverhalten der Aufleimer in der Prüfmaschine am Institut für Polymer-<br>werkstoffe und Kunststofftechnik . . . . .                 | 69 |
| 7.3  | Vergleich der beiden Klemmbacken . . . . .                                                                                              | 70 |

## Tabellenverzeichnis

|     |                                                                                                           |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Vorteile von Flachs- und Kohlefasern . . . . .                                                            | 5  |
| 2.2 | Nachteile von Flachs- und Kohlefasern . . . . .                                                           | 6  |
| 5.1 | Trendlinien der Fließweglängen in Abhängigkeit der Prozesszeit . . . . .                                  | 54 |
| 5.2 | Prozesszeiten für die Fließweglängen 15 cm und 25 cm im Vergleich zum<br>Kohlefaserlaminat . . . . .      | 54 |
| 6.1 | Kennwerte der einzelnen Bestandteile . . . . .                                                            | 56 |
| 6.2 | Faservolumenanteile der Lamine . . . . .                                                                  | 57 |
| 6.3 | Anwendung der Mischungsregel . . . . .                                                                    | 57 |
| 6.4 | Mischungsregel der Festigkeit . . . . .                                                                   | 59 |
| 6.5 | Berechnete Ingenieurskonstanten . . . . .                                                                 | 60 |
| 6.6 | Unterschied von den berechneten zu den experimentell ermittelten Inge-<br>nieurskonstanten in % . . . . . | 60 |
| 6.7 | Festigkeit nach dem Bruchkriterium maximaler Spannung . . . . .                                           | 66 |



---

# 1 Einleitung

Das Interesse an Verbundwerkstoffen ist in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Grund dafür sind die stetig zunehmenden Anforderungen an nachhaltigen und leistungsfähigen Werkstoffen. Auch Hybridfaserverbunde gewinnen dadurch mehr an Bedeutung. Natur- und Kohlefaserhybridverbunde stellen eine innovative Materialklasse dar, die die Vorteile von biologisch abbaubaren Naturfasern und die sehr guten mechanischen Eigenschaften der Kohlefaser vereinen. Diese Verbunde bieten mit dem Einsatz nachwachsender Rohstoffe zudem eine bessere Umweltbilanz in verschiedenen Bereichen wie der Automobilindustrie oder der Luft- und Raumfahrt [1–3].

Ein wichtiger Faktor bei der Herstellung von Faserkunststoffverbunden ist die Wirtschaftlichkeit. Neben den ressourcenschonenden Naturfasern bringen diese einen weiteren Vorteil für den Herstellungsprozess mittels Vakuuminfusion mit sich. Der Prozess der Vacuum Assisted Resin Infusion ermöglicht große und komplexe Bauteile herzustellen. Dabei spielen die Produktionszeiten für die Wirtschaftlichkeit und Skalierbarkeit des Verfahrens eine entscheidende Rolle. Die Infusionszeit ist neben der Vorbereitungszeit und der Aushärtezeit ein zeitkritischer Faktor, den es zu optimieren gilt. Mit der Verwendung von Naturfasern entsteht für Infusionsverfahren über deren hohen Permeabilität gegenüber der der Kohlefasern das Potential die Infusionszeiten deutlich zu verringern. Naturfasern agieren dabei als Fließunterstützung für die Infusion der Kohlefasern [2, 3].

Zusätzlich dazu haben die Naturfasern gute Dämpfungseigenschaften. Vibrationen und Schwingungen können dadurch besser absorbiert werden, was besonders für die Automobil- und Luftfahrtbranche von Interesse ist. Der Komfort wird verbessert, indem Vibrationen und Geräusche verringert werden [1, 4, 5].

Die Entwicklung eines Bauteils bestehend aus Faserkunststoffverbunden beginnt mit der Konzeptphase, in der die Anforderungen an das Produkt definiert werden. Mit der Materialauswahl werden geeignete Fasern sowie Matrix für die entsprechenden Anforderungen ausgewählt. Mit vorhandenen Kennwerte von Faser und Matrix erfolgt die Bauteilauslegung. Für eine erste Abschätzung der mechanischen Kennwerte erfolgt über die klassische Laminattheorie. Die Anordnung und Anzahl an Lagen wird festgelegt. Die genaue Auslegung und Optimierung der Struktur erfolgt über Belastungsanalysen und Simulationen, um die bestmögliche Abstimmung der Materialien für ein Bauteil zu erreichen. Die Verwendung der Naturfasern als Fließunterstützung zur Produktionszeitverringerung kann die Auslegung von Bauteilen mit Hinblick auf die Position der Naturfaserlagen vor Herausforderungen stellen [2].

---

## 2 Forschungsstand und theoretische Grundlagen

### 2.1 Faserkunststoffverbunde

Um ein optimiertes Eigenschaftsprofil zu schaffen, werden Kunststoffe mit Fasern verstärkt. Die Fasern werden dafür mit der noch unausgehärteten Matrix infundiert und umschlossen. Die Matrix hält nach der Aushärtung die Fasern in Form und schützt sie vor äußeren Einflüssen. Hingegen die Fasern sind in der Lage hohe mechanische Belastungen aufzunehmen, die von der Matrix in die Fasern eingeleitet werden [1, 2].

Die Faserrichtung und der Faservolumenanteil sind entscheidende Faktoren für die mechanischen Eigenschaften des Verbundes. In Faserrichtung sind die Kennwerte des Laminats besser, als quer zur Faserrichtung. Vorrangig werden für die Matrix Reaktionsharze verwendet. Der Faserkunststoffverbund wird als homogenes Material mit einheitlichen Eigenschaften betrachtet, in dem die Verstärkungsfasern Verformungen und äußere Belastungen uneingeschränkt auf angrenzende Fasern übertragen und somit einen fließenden Übergang zwischen Faser und Matrix bilden. Die Anordnung der einzelnen Textillagen ist meist symmetrisch und beeinflusst über die Faserorientierung die mechanischen Eigenschaften des Laminats [1, 2].

### 2.2 Faserverstärkungen

Faserverstärkungen weisen eine hohe Festigkeit bei geringer Dichte auf. Je nach Anwendung werden unterschiedliche Verstärkungen in einem Faserverbund genutzt [6]. Im Rahmen dieser Arbeit werden Flachs- und Kohlefasern verwendet und in diesem Abschnitt näher erläutert.

#### 2.2.1 Kohlefaser

Die Kohlenstofffaser ist eine technische Faser mit hoher Festigkeit und Steifigkeit bei geringer Bruchdehnung. Zudem weisen die Fasern bei diesen hohen mechanischen Eigenschaften eine geringe Dichte auf. Organische Ausgangsmaterialien werden zur Herstellung der Kohlefaser genutzt. Dabei sind einige Schritte notwendig, bei denen nahezu alle Elemente außer Kohlenstoff abgespalten werden. Mit zunehmender Temperatur und steigender Graphitisierung nehmen die mechanischen Eigenschaften zu. Hauptsächlich gibt es drei Arten an Ausgangsmaterialien zur Herstellung von Kohlenstofffasern. Fasern mit Zellulose als Ausgangsmaterial werden überwiegend als thermisch hochbelastbare Isolierwerkstoffe verwendet, da sie eine weniger perfekte Struktur aufweisen. Ab den 1980er Jahren begann die Herstellung der Fasern durch Polyacrylnitril (PAN), welche heute als Standardfasern gelten. Zuletzt ist die Herstellung mit Pech zu nennen, dabei lassen sich Fasern über einen

aufwendigen Reinigungs- und Aufbereitungsprozess herstellen. Diese Fasern zeichnen sich durch eine hohe Steifigkeit sowie verbesserte thermische und elektrische Eigenschaften aus, während die Druckfestigkeit niedriger ist. Im Allgemeinen ist die Herstellung von Kohlefasern sehr energieintensiv und aufwendig [1].

### 2.2.2 Flachsfaser

Naturfasern können aus vielen Ausgangsmaterialien bestehen und lassen sich grob in tierische und pflanzliche Fasern unterteilen. Vorteile sind unter anderem das geringe spezifische Gewicht, die geringe Abnutzung des Materials bei mechanischer Beanspruchung, der eigene Brennwert bei der Entsorgung sowie die große Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien. Zudem ist der Energiebedarf bei der Herstellung gering. Probleme ergeben sich durch Streuung der Eigenschaftswerte, Feuchtigkeitsempfindlichkeit und begrenzte Faserlänge. Des Weiteren müssen Altersbeständigkeit und Geruchsneutralität unter wechselnden Klimabedingungen sichergestellt werden [6].

Durch die starken natürlichen Schwankungen der geometrischen Maßen von Naturfasern ist es unpraktikabel den Faserquerschnitt als Größe für die Feinheit der Garne zu nutzen. Deswegen wird allgemein die tex-Zahl zur Angabe der Feinheit verwendet. Sie gibt das Verhältnis von Masse zu Länge an ( $1 \text{ tex} = \frac{1\text{g}}{1000\text{m}}$ ) [6].

In Abbildung 2.1 ist links eine typische Struktur von Spinnfasergarnen dargestellt. Rechts ist ein einzelner Garn des Flachsfasergeleges, welches im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, abgebildet. Bei den Garnen tritt eine Garnhaarigkeit auf. Diese entsteht durch die begrenzte Faserlänge dessen Faserenden nicht eingebunden werden und so nach außen abstecken. Die abstehenden Faserenden sorgen für eine rauere Oberfläche und ein erhöhtes Volumen. Die Haarigkeit wird durch das Verhältnis von Faserlänge und Faserfeinheit, dem Spinnverfahren und den Prozessparametern beeinflusst [6].

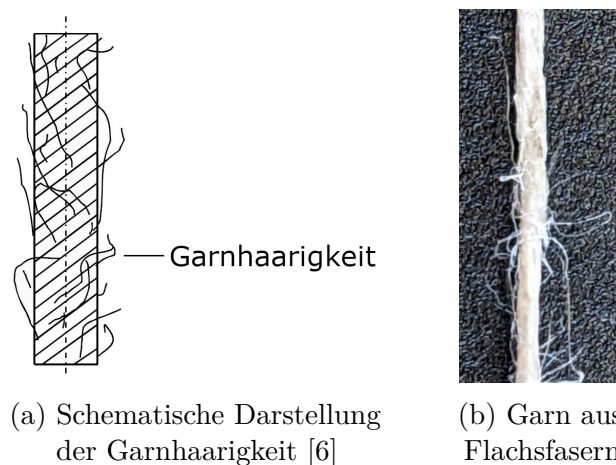


Abbildung 2.1: Garnhaarigkeit

## 2.3 Epoxid Matrix

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Duomer als Matrixmaterial verwendet. Die Kettenmoleküle eines Duomers sind engmaschig durch Hauptvalenzkräfte vernetzt. Dadurch ist die Matrix weder löslich noch schmelzbar. Im chemischen Herstellungsprozess entsteht die Matrix in dem das verwendete Reaktionsharz mit einem entsprechenden Härter und gegebenenfalls einem Vernetzungsbeschleuniger reagiert. Zu den wichtigsten Reaktionsharzen zählen die ungesättigten Polyester, die Vinylesterharze, die Phenolharze und die Epoxidharze [1, 7]. Für die Herstellung der Proben wurde ein Epoxidharz verwendet.

Meist haben Epoxidharze zwei endständige Epoxidgruppen, die in einer Polyadditionsreaktion mit einem entsprechenden Härter, beispielsweise einem Amin, miteinander vernetzt werden. Der Härter nimmt dabei, anders als bei anderen Reaktionsharzen, aktiv an der Reaktion teil und wird entsprechend des stöchiometrischen Anteils dem Epoxidharz hinzugefügt. Wichtig dafür ist der Epoxid-Wert des Harzes, der die benötigte Masse des Härters für 100 g Epoxidharz angibt [1].

Der entstehende Duomer gilt als hochwertig und ist durch die Vielzahl an verschiedenen Harzen und Härttern flexibel in seinen Eigenschaften. Dazu zählen zum Beispiel elektrische Isolierung, gute mechanische Eigenschaften und chemische Beständigkeit, die wiederum durch den Härter beeinflusst werden kann [1].

Der Ablauf einer solchen Härtungsreaktion weist unterschiedliche Merkmale auf. Im Laufe der exothermen Reaktion steigt die Temperatur des Gemischs stark an, bis ein großer Teil der Reaktionspartner reagiert hat. Nun liegt bereits ein stark vernetzter Duomer vor. Die wenigen restlichen reaktiven Gruppen reagieren deutlich langsamer miteinander, wodurch die Temperatur abnimmt. Oft wird für eine vollständige Reaktion Wärme zugeführt. Für den Herstellungsprozess ist die Viskosität ein bedeutender Faktor, welche in der anfänglichen Phase durch die steigende Temperatur etwas abnimmt und anschließend, aufgrund des steigenden Vernetzungsgrads, einem exponentiellen Anstieg folgt. Außerdem erhöht sich die Dichte bei der Aushärtung und es kommt zu einer Volumenabnahme [1].

## 2.4 Faservolumengehalt

Der Faservolumengehalt (FVG) ist das Volumenverhältnis von Verstärkungsfasern zu Matrix eines Faserkunststoffverbundes und ist ein entscheidender Faktor für dessen mechanischen Eigenschaften. Ziel ist es einen möglichst hohen Faservolumenanteil zu erreichen, da die Verstärkungsfasern die größten Lasten aufnehmen können. Ist der Anteil an Fasern allerdings zu hoch, so kann es vorkommen, dass die Fasern nicht ausreichend mit der Matrix getränkt sind. Bei Belastungen können Delaminationen und somit ein Versagen des

Bauteils die Folge sein. Ein Faservolumenanteil von 60% gilt im Allgemeinen als optimales Verhältnis für die Eigenschaften des Verbundes [1, 7]. Der Faservolumengehalt kann über Gleichung 2.1 berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass der Verbund nur aus zwei Komponenten, Faser und Matrix, besteht und keine Hohlräume oder Verunreinigungen enthält [8].

$$\varphi = \frac{LZ \cdot M_A}{\rho_F \cdot d \cdot 1000} \quad (2.1)$$

|           |                                                    |
|-----------|----------------------------------------------------|
| $\varphi$ | Faservolumengehalt in % oder dimensionslos         |
| $LZ$      | Lagenanzahl                                        |
| $M_A$     | Flächengewicht des Fasergewebes in $\frac{g}{m^2}$ |
| $\rho_F$  | Dichte der Fasern in $\frac{g}{cm^3}$              |
| $d$       | Dicke der Probe in $mm$                            |

## 2.5 Hybridfaserverbunde

Bei den Hybridfaserverbunden werden zwei unterschiedliche Arten von Fasern in einem Faserkunststoffverbund verwendet. Das Ziel ist es, die Vorteile beider Faserarten optimal auszunutzen, sodass die Vorteile der einen Faserart die Nachteile der Anderen ausgleichen. In den letzten Jahren ist die Herstellung von Faserverbunden mit zwei oder mehr Faserverstärkungen stark angestiegen. Dabei gibt es unterschiedliche Arten der Hybridfaserverbunde. Synthetisch-synthetisch, synthetisch-natürlich und natürlich-natürlich gehören zu den am weitest verbreiteten Varianten. Die Hybridisierung von synthetischen und natürlichen Fasern soll der Abhängigkeit von den synthetischen Fasern entgegenwirken [3].

In den beiden Tabellen 2.1 und 2.2 sind einige der wichtigsten Vor- und Nachteile der Flachs- und der Kohlefasern zusammengefasst [1, 4, 6, 9].

Tabelle 2.1: Vorteile von Flachs- und Kohlefasern

| Flachsfaser                 | Kohlefaser                     |
|-----------------------------|--------------------------------|
| geringe Dichte              | geringe Dichte                 |
| hohe Permeabilität          | hohe mechanische Eigenschaften |
| geringe Wärmeausdehnung     | geringe Wärmeausdehnung        |
| gute Dämpfungseigenschaften |                                |

Tabelle 2.2: Nachteile von Flachs- und Kohlefasern

| Flachsfaser                           | Kohlefaser             |
|---------------------------------------|------------------------|
| schlechtere mechanische Eigenschaften | hohe Kosten            |
|                                       | hoher Ressourcenbedarf |
|                                       | geringe Permeabilität  |

Ein wichtiger Aspekt sind die ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizient beider Verstärkungsmaterialien. Bei entsprechender thermischer Belastung kommt es dementsprechend weniger zu Mikrorissen aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungen [1, 9, 10].

Für die Verwendung der beiden Faserarten in einem Hybridverbund stehen sich vor allem die mechanischen Eigenschaften und die unterschiedlichen Permeabilitäten gegenüber. Die Kohlefasern sollen im Hybridverbund für gute mechanische Kennwerte sorgen, während die Naturfasern als Fließunterstützung mit höherer Permeabilität für schnellere Infusionszeiten dienen können.

## 2.6 Strukturmechanik der Faserverbunde

In der Strukturmechanik finden sich unterschiedliche Betrachtungsweisen auf die unterschiedlichen Kennwerte von Faserkunststoffverbunden wider. Während die klassische Laminattheorie einen mehrschichtigen Verbund basierend auf den Ingenieurskonstanten analysiert, ermöglichen Mischungsregeln eine einfache Abschätzung der Kennwerte über den Faservolumengehalt. Mit Versagenskriterien können je nach vorhandenen Kennwerten die Festigkeit eines Faserverbunds bei Vorgabe einer bestimmten Last untersucht werden.

### 2.6.1 Mischungsregel

Für eine grobe Abschätzung der Eigenschaften in Faserrichtung kann die Mischungsregel nach 2.2 verwendet werden. Für den E-Modul  $E_1$  in Faserrichtung wird dafür eine Parallelschaltung der elastischen Mechanismen, widergespiegelt durch die Steifigkeiten der beiden Bestandteile des Faserverbunds (E-Modul der Faser  $E_F$  und der Matrix  $E_M$ ), angenommen. Dies ist schematisch mit jeweils einer Feder in Abbildung 2.2 dargestellt [10, 11].

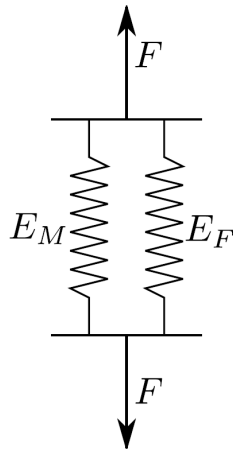


Abbildung 2.2: Parallelschaltung der Steifigkeiten von Faser und Matrix [11]

Für die Mischungsregel werden anteilig nach Volumen die Steifigkeiten summiert:

$$E_1 = E_F \cdot \varphi + E_M \cdot (1 - \varphi) \quad (2.2)$$

Darüber hinaus kann diese Mischungsregel ebenso für eine Abschätzung der Festigkeit des Faserverbunds genutzt werden. Die Festigkeiten der Fasern bzw. der Matrix ersetzen dabei die E-Moduln. Eine weitere Möglichkeit der simplen Abschätzung der Verbundfestigkeit infolge eines Faserbruchs ermöglicht folgende Mischungsregel 2.3 [11]:

$$\sigma_1 = \sigma_F \cdot \left( \varphi + (1 - \varphi) \cdot \frac{E_M}{E_F} \right) \quad (2.3)$$

Dabei wird das Verhältnis aus Festigkeit und Steifigkeit des Verbunds mit der Festigkeit und dem E-Modul der Faser gleichgesetzt und anschließend umgestellt [11].

### 2.6.2 Klassische Laminattheorie

Die Erklärungen für die klassische Laminattheorie basieren alle auf dem Buch von Helmut Schürmann ("Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden") [10].

Für die klassische Laminattheorie wird die Steifigkeitsmatrix einer einzelnen Lage ermittelt und anschließend je nach Lagenaufbau und Lagendicke in eine Steifigkeitsmatrix des gesamten Laminats umgewandelt. Über die Ingenieurskonstanten der E-Moduln  $E_1$  und  $E_2$ , des Schubmoduls  $G_{12}$  und der Querkontraktionszahl  $\nu_{12}$  kann die Einzelschicht beschrieben werden. Der Index 1 steht für die Richtung längs zur Faser und der Index 2 quer zur Faserorientierung. Für die Steifigkeit einer Einzellage als Scheibenelement werden folgenden Annahmen getroffen:

- kleine Verformungen

- linear, ideal elastisches Materialverhalten
- Dünnwandigkeit mit ebenen Spannungszustand  $\Rightarrow$  Spannungen in Dickenrichtung werden als Null angenommen:  $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$

Unter diesen Annahmen kann das lineare Elastizitätsgesetz mit der Steifigkeitsmatrix  $[Q]$  in einer Einzellage formuliert werden:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

|               |                    |
|---------------|--------------------|
| $\sigma$      | Normalspannung     |
| $\tau_{12}$   | Schubspannung      |
| $[Q]$         | Steifigkeitsmatrix |
| $\varepsilon$ | Dehnung            |
| $\gamma$      | Scherung           |

Mit den vier Ingenieurskonstanten gelten folgende Beziehungen:

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (2.5)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (2.6)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (2.7)$$

Die beiden Querkontraktionszahlen ( $\nu_{12}$ ,  $\nu_{21}$ ) sind über die Dehnung längs ( $\varepsilon_1$ ) und quer ( $\varepsilon_2$ ) zur Faserrichtung definiert:

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (2.8)$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2.9)$$

Mittels einer Polartransformation ist es möglich verschiedene Faserorientierungen und deren Spannungen von dem Schichtkoordinatensystem in das Laminatkoordinatensystem



umzurechnen. Da im Rahmen dieser Arbeit lediglich UD-Lamine betrachtet werden, ist eine Polartransformation nicht notwendig.

Werden darüber hinaus Biegefälle mit einbezogen, wird das Elastizitätsgesetz wie folgt erweitert:

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_{xy} \\ m_x \\ m_y \\ m_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{16} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Zusammengefasst dargestellt als:

$$\begin{bmatrix} \{n\} \\ \{m\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\varepsilon\} \\ \{\kappa\} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Mit den folgenden Einheiten:

$$\begin{bmatrix} \frac{N}{mm} \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N}{mm} & N \\ N & Nmm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} - \\ \frac{1}{mm} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

|          |                            |
|----------|----------------------------|
| n        | Normalkraft                |
| m        | Biegemoment                |
| [A]      | Membran-Steifigkeitsmatrix |
| [B]      | Koppel-Steifigkeitsmatrix  |
| [D]      | Biege-Steifigkeitsmatrix   |
| $\kappa$ | Krümmung                   |

In Abbildung 2.3 ist die Mittelebene als Bezugsfläche mit Schichtnummerierung eines Laminats dargestellt. Diese Festlegung ist für die folgenden Gleichungen von Bedeutung.

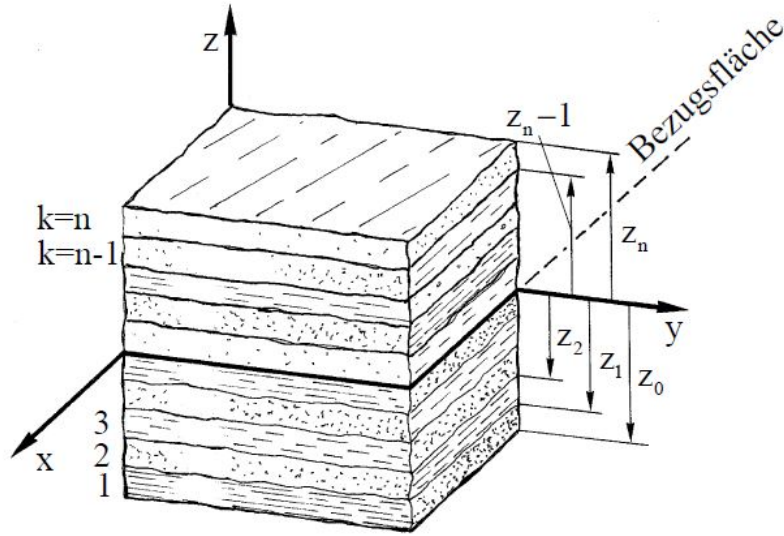


Abbildung 2.3: Festlegung der Mittelebene als Bezugsfläche und der Schichtnummerierung

Für die Untermatrizen  $[A]$ ,  $[D]$  und  $[B]$  gilt mit der Schichtdicke  $d_k$  und dem Abstand  $z_k$  zur Mittelachse des Laminats:

Membran-Steifigkeitsmatrix  $[A]$ :

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} (z_k - z_{k-1}) = \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} \cdot d_k \quad (2.13)$$

Über  $k$  wird die Einzellage referenziert. Mit der Membran-Steifigkeitsmatrix werden die Steifigkeiten in Bezug auf die Normalspannungen beschrieben.

Biege-Steifigkeitsmatrix  $[D]$ :

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} (z_k^3 - z_{k-1}^3) = \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} \cdot \left( \frac{d_k^3}{12} + d_k \left( z_k - \frac{d_k}{2} \right)^2 \right) \quad (2.14)$$

Mit dieser Untermatrix sind die Biegesteifigkeiten des Laminats angegeben.

Koppel-Steifigkeitsmatrix  $[B]$ :

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} (z_k^2 - z_{k-1}^2) = \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} \cdot d_k \cdot \left( z_k - \frac{d_k}{2} \right) \quad (2.15)$$

Die Untermatrix  $[B]$  ist für symmetrische Laminats Null. Im Fall eines asymmetrischen Laminats gibt diese Matrix die Verknüpfung zwischen den beiden Untermatrizen  $[A]$  und  $[D]$  an. Sind interne Zugspannungen bei einem asymmetrischen Laminat vorhanden, so kann dies in einer Biegeverformung resultieren.

Für die Berechnung der Ingenieurskonstanten gelten unter der Berücksichtigung der

Querkontraktionsbehinderung ( $\sigma_2 = \tau_{12} = 0$ ) durch die einzelnen Lagen mit der Gesamtdicke  $d$  des Laminats folgende Gleichungen:

$$E_1 = \frac{A_{11}}{d}; E_2 = \frac{A_{22}}{d}; G_{12} = \frac{A_{66}}{d} \quad (2.16)$$

Bei Biegebeanspruchungen ist die Position der Lagen entscheidend, sodass die Herleitung für den Biegemodul mit der Analogie zum Balken erfolgt. Es ergibt sich mit einem rechteckigen Querschnitt mit der Flächenträgheit  $I$  und der :

$$M = -EI \cdot w'' = -E \cdot \frac{b \cdot d^3}{12} \cdot w'' \longrightarrow m = -E \cdot \frac{d^3}{12} \cdot w'' \quad (2.17)$$

Die D-Matrix beschreibt die Biegebeanspruchungen des Laminats unter der Voraussetzung einer Querkontraktionsbehinderung bzw. Querkrümmungsbehinderung ( $\kappa_2 = \kappa_{12} = 0$ ):

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Es ergibt sich mit der Krümmung  $w'' = -\kappa$  und Gleichung 2.17 der Biegemodul:

$$E_{1b} = \frac{12}{d^3} \cdot D_{11} \quad (2.19)$$

Dieses Vorgehen gilt lediglich für symmetrische Lamine. Für den Fall eines asymmetrischen Laminats ist es notwendig die Inverse der ABD-Matrix zu bilden und anschließend die Terme zu verwenden.

Zur Bestimmung der Schichtspannungs- und Schichtdehnungsverteilung wird Gleichung 2.10 mit der Inversion der gesamten ABD Matrix nach den Verformungen  $\varepsilon$  und  $\kappa$  umgestellt. Diese geben die Verformung in der Mittelebene (Index 0) an. Die Verzerrungen der Einzelschichten  $\varepsilon_{1,k}$ ,  $\varepsilon_{2,k}$  und  $\gamma_{12,k}$  berechnen sich wie folgt:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}_0 + z_k \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_{12} \end{bmatrix}_0 \quad (2.20)$$

Mit  $z = z_k$  bzw.  $z = z_{k-1}$  wird die Verzerrung am oberen bzw. unteren Rand der Schicht ermittelt. Über die Verzerrungen der Einzelschichten können mit dem Elastizitätsgesetz 2.4 die entsprechenden Spannungen berechnet werden.

Zusätzlich zu den oben genannten Voraussetzungen gelten folgende Annahmen für die Berechnungen über die klassische Laminattheorie:

- die Dicke  $d$  ist konstant und gegenüber den Flächenabmessungen sehr klein
- die Durchbiegung  $w$  ist deutlich kleiner als die Dicke  $d$
- das Laminat verhält sich schubstarr, Schubverformungen in Dickenrichtung werden nicht beachtet
- perfekte Faser-Matrix-Haftung und somit ideale Kraftübertragung ohne Gleiterscheinungen zwischen zwei Lagen

### 2.6.3 Bruchkriterium

Bruchkriterien finden für Konstrukteure in der Festigkeitsanalyse ihre Anwendung. Im Anschluss einer Spannungsanalyse wird ein solcher Festigkeitsnachweis durchgeführt und ausreichende Sicherheiten gegen das Versagen eines Laminats ermittelt. Eine Struktur wird über den Vergleich zwischen auftretender und ertragbarer Belastung dimensioniert. Entsprechend der Lastaufnahme werden Dimensionen und Abmessungen festgelegt. Bei Faserkunststoffverbunden sind dies beispielsweise Fasermengen, Faserorientierungen oder die Schichtreihenfolge [10].

Bei einem Bruchkriterium wird die Festigkeit mit der an der Schicht liegenden Spannung verglichen. Im Falle einer einachsigen Belastung wird die Spannung  $\sigma$  mit der zugehörigen Festigkeit  $R$  in ein Verhältnis gestellt. Sind beide Werte gleich groß, so tritt der Bruch ein. Die allgemeine Formulierung eines Bruchkriteriums gibt Gleichung 2.21 an [10].

$$\sum_{j=1}^n \frac{|\sigma_j|}{R_j} = 1 \quad (2.21)$$

Damit können mehrachsige Belastungszustände betrachtet werden. Eine solche Überlagerungsformel bietet die Möglichkeit Auswirkungen von Beanspruchungen auf andere, nicht direkt zugehörige Versagensformen miteinzubeziehen. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich die axiale Belastung in Faserrichtung mit  $\frac{\sigma_1}{R_1}$  betrachtet [10].

---

### 3 Zielsetzung und Konzept der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll die potentielle Nutzung von Naturfasern als Fließunterstützung in einem Hybridfaserverbund untersucht werden. Dafür werden die mechanischen Eigenschaften und die Infusionszeiten im VARI-Prozess für unterschiedliche Konfigurationen betrachtet. Im Allgemeinen kann eine Vorkompaktierung der Naturfaserlagen dazu führen die mechanischen Kennwerte des Verbunds zu verbessern [12]. Inwiefern eine Kompaktierung bei Hybridfaserverbunden sinnvoll sein kann, wird über die mechanischen Kennwerte und Infusionszeiten bewertet.

In Abbildung 3.1 sind die zu untersuchenden Konfigurationen zu sehen. Ein Hybridverbund besteht aus sechs Lagen Kohlerfasern und zwei Lagen Flachsfasern, welche in der Reihenfolge unterschiedlich angeordnet werden. Alle Lamine sind unidirektional. Die Lagen in schwarz stellen die Kohlefasern, die Hellgrünen die Flachsfasern und die Dunkelgrünen die kompaktierten Flachsfasern dar.

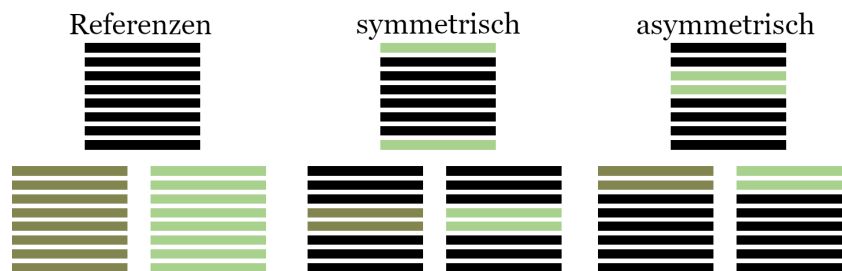


Abbildung 3.1: Verwendete Konfigurationen

Für die Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Hybridfaserverbunden über die klassische Laminattheorie werden folgende Parameter ermittelt:

- Zugeigenschaften längs und quer zur Faserrichtung  $\Rightarrow$  E-Moduln, Querkontraktionszahlen, Festigkeiten
- Biegeeigenschaften mittels Drei-Punkt-Biegung und dynamisch mechanischer Analyse  $\Rightarrow$  Biegemodul, Biegefestigkeit, Speichermodul, Verlustmodul
- Schubeigenschaften mittels Drei-Schienen Schubversuch  $\Rightarrow$  Schubmodul

Die Ingenieurskonstanten der Referenzlamine werden dazu genutzt, um mit der Laminattheorie die Eigenschaften der Hybridverbunde zu berechnen. Anschließend werden diese mit den experimentell ermittelten Werten verglichen.

Die prozesstechnische Betrachtung der Infusionsdauer erfolgt über den Infusionsfortschritt in Abhängigkeit der Zeit. Der Einfluss der Kompaktierung wird durch dessen Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften und auf die Infusionszeiten bewertet.

## 4 Material und Methoden

Die Faserkunststoffverbundproben für diese Arbeit bestehen aus einem Epoxidharzsystem (Harz: RIMR 035C, Härter: RIMH 038) von *Westlake* und UD-Gelegen aus Kohle- sowie Naturfasern. Das verwendete Naturfasergelege Amplitex 5025 von *Bcomp* hat ein Flächengewicht von  $280 \frac{g}{m^2}$ . Für eine bessere Vergleichbarkeit wird das UD-Kohlefasergelege C300U von *Hacotech* mit einem ähnlichem Flächengewicht von  $300 \frac{g}{m^2}$  genutzt.

#### 4.1 Probekörperherstellung mittels Infusionsverfahren

Für die Herstellung der Faserverbundproben wird ein Harzinfusionsverfahren angewandt. Dafür werden trockene Fasern in ein Werkzeug gelegt und mit einem Harzsystem infundiert. Es entsteht durch die exotherme Vernetzungsreaktion von Harz und Härter ein festes Bauteil. Dabei ist zu gewährleisten, dass die Fasern vollständig imprägniert werden, um trockene Stellen in dem Laminat zu vermeiden [7].

Unterschiedliche Varianten der Harzinjektions- und Harzinfusionsverfahren sind möglich. Dazu zählen das Resin Transfer Moulding Verfahren (RTM) und das Vacuum Assisted Resin Infusion Verfahren (VARI). In dem RTM Verfahren werden die Fasern mit zwei Werkzeugseiten auf eine gewünschte Kavität gebracht und mit dem Harzsystem durch Überdruck imprägniert. Das für diese Arbeit verwendete VARI Verfahren hingegen kompaktiert und imprägniert die Fasern durch Unterdruck. Für eine vollständige Imprägnierung der Fasern ist mindestens ein Vakuumanschluss am Fließwegende vorhanden. Für den Anguss gibt es verschiedene Varianten wie zum Beispiel Punkt- oder Linienanguss. Je größer der Angussbereich, desto schneller ist das Bauteil imprägniert. Der Aufbau des VARI Verfahrens ist jedoch mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden und eignet sich nur für Produktserien geringer Stückzahl [7, 13, 14]. Der schematische Aufbau des VARI-Verfahrens ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

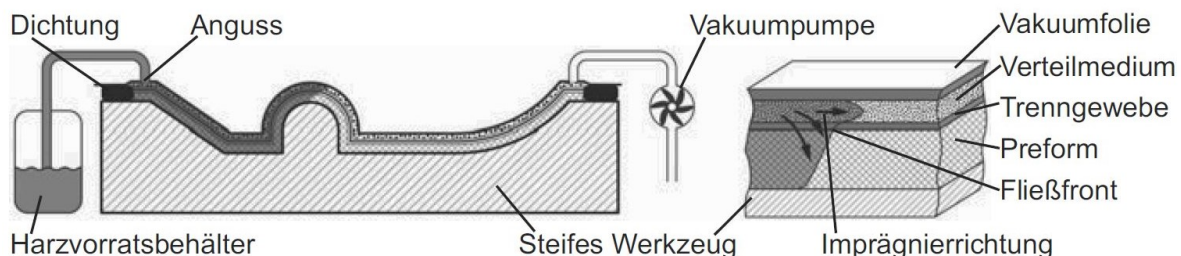


Abbildung 4.1: Schema des VARI Verfahrens [6]

Die Fasergelege werden auf einem steifen Werkzeug platziert. Darüber kann für kürzere Infusionszeiten ein Verteilmedium gelegt werden, welches mit einem Trenngewebe nach dem Aushärten des Bauteils wieder entfernt wird. Das Verteilmedium sorgt für eine zusätzliche



Infundierung der Fasern in Dickenrichtung. Mit einer Dichtmasse und Vakuumfolie wird der Aufbau luftdicht verschlossen [6].

### 4.1.1 Durchführung des VARI-Verfahrens

Zunächst wird eine Werkzeugplatte mit Aceton gereinigt und mit einem Trennmittel vorbehandelt. Anschließend kann das Vakuumdichtband sowie der An- und Abguss aufgebracht werden. Die Zuschnitte entsprechender Größe sind in das entstandene Rechteck aus Dichtband zu platzieren, bevor der Aufbau durch die Vakuumfolie luftdicht verschlossen wird. Harz und Härter werden im Verhältnis 100 : 28 durchmischt und 10 *min* entgast. Die Menge des Harzes lässt sich anhand des Gewichts der für das Laminat verwendeten Fasern abschätzen. Die Harzmenge entspricht mindestens dem doppeltem Gewicht des Textilmaterials. Abschließend kann durch Anlegen des Vakuums der Start der Infusion erfolgen. Der Fließfortschritt wird in regelmäßigen Abständen markiert und mit entsprechender Zeitangabe notiert. Der Aufbau für die Infusion ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Nach vollständiger Infusion werden die Platten zum Aushärten für mindestens 4 Stunden in einem Ofen bei 80 °C gelagert. Es werden zwei Platten je Konfiguration hergestellt..

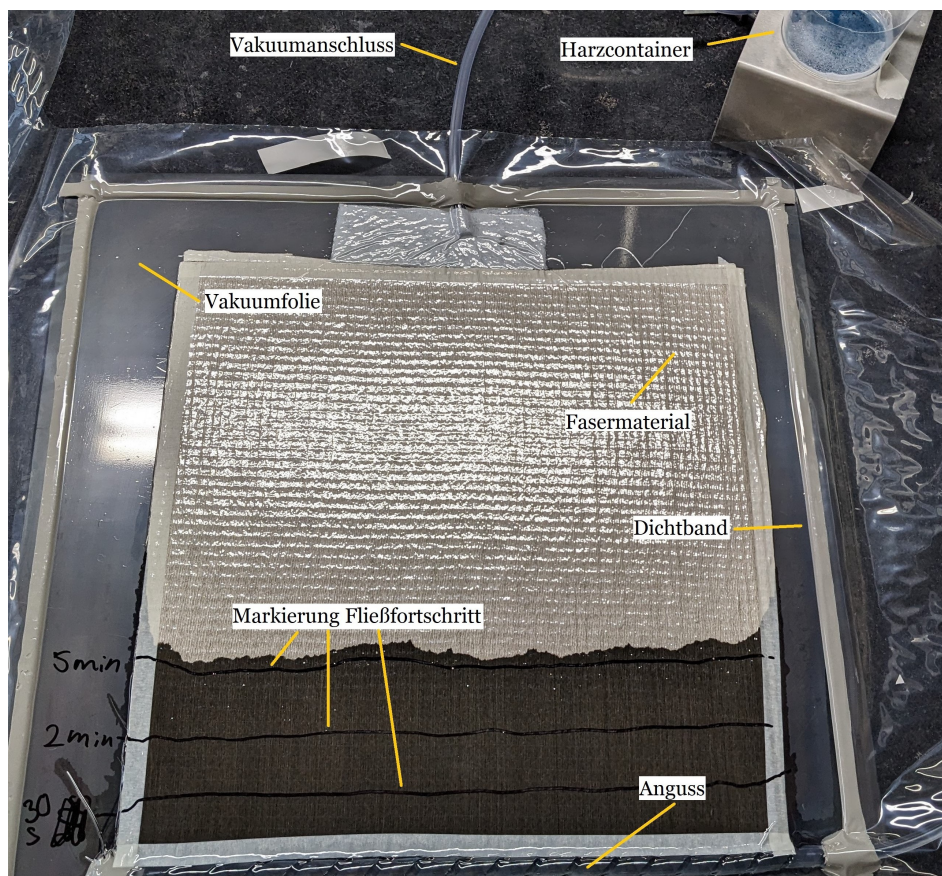


Abbildung 4.2: VARI-Aufbau während der Infusion

Die entformten Lamine werden anschließend auf Probengröße entsprechend der Prüfmethode zugesägt. Die Maßen der jeweiligen Proben können in den folgenden Abschnitten entnommen werden.

## 4.2 Kompaktierung der Naturfaserlagen

Die Naturfaserlagen werden vor der Infusion in einer Presse von *Rucks* Typ KV 214.00 bei 120 °C und 38 bar für 15 min vorkompaktiert. Dafür werden die Fasern mit einer Fläche von 36 cm x 36 cm und einem Stempel entsprechender Größe in die Presse gelegt. Die Druckanzeige der Presse bezieht sich auf einen Presskolbendurchmesser von 200 mm. Um diese Flächenänderung von dem Kolben auf die Probe für 38 bar auszugleichen, wird der Druck der Presse auf 156 bar angepasst. Die Kompaktierung erfolgt mit einer Pressgeschwindigkeit von  $0,04 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  (dies entspricht etwa  $0,56 \frac{\text{MPa}}{\text{s}}$ ) und einer Entlastungsgeschwindigkeit von  $0,05 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ . Aufgrund von Relaxierungsvorgängen der Naturfasern ist die Kompaktierungsgeschwindigkeit ein wichtiger Faktor in der Durchführung [12].

## 4.3 Prüfmethoden

In diesem Abschnitt werden die in dieser Arbeit verwendeten Prüfmethoden beschrieben. Dabei wird auf die Normen mit entsprechender Abweichung sowie die mathematische Bestimmung einzelner Kennwerte eingegangen.

### 4.3.1 Ermittlung des Schubmoduls

Die Ermittlung des Materialverhaltens bei Schubbeanspruchung erfolgt durch eine Schubprüfung, welche auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden kann. Eine reine Schubbeanspruchung bei Faserverbunden ist durch deren inhomogene Spannungszustände oft nur schwer zu realisieren. Unterschiedliche Verfahren zur Beurteilung des Schubverhaltens sorgen für teils stark schwankende Ergebnisse [6]. Die hier verwendete Drei-Schienen-Schubprüfung wird in Anlehnung an die Norm ASTM D4255 durchgeführt. Der Aufbau der Apparatur ist in Abbildung 4.3 dargestellt.



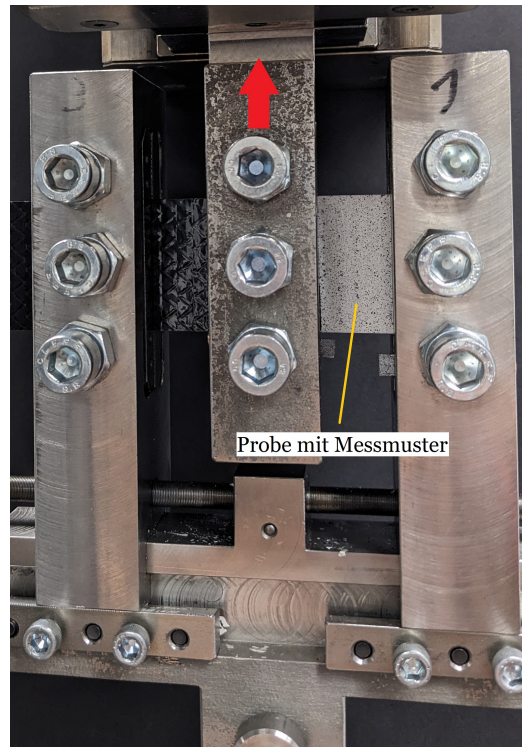


Abbildung 4.3: Aufbau zur Messung des Schubmoduls

Zu dem Aufbau gehören drei Schienen, die zur Probeneinspannung dienen. Der Krafteintrag erfolgt über die mittlere Schiene. Um Dehnungen einer Probe präzise messen zu können, wird ein Kamerasystem mit digitaler Bildkorrelation von *Carl Zeiss GOM Metrology GmbH* verwendet. Dafür wird in dem Messbereich ein Messmuster mit weißer Grundierung und schwarzen Farbpartikeln aufgesprüht. Dies ist beispielhaft auf einer Schubprobe in Abbildung 4.4 zu sehen.



Abbildung 4.4: Schubprobe mit Messmuster

Die Position dieses Musters entspricht einem Messfenster, in dem die Bildkorrelation stattfindet. Die Farbe sollte sich nicht im Klemmbereich befinden, da dies das Risiko für ein Rutschen der Probe erhöht. Das Muster dient dazu, mit der weißen und schwarzen Farben einen deutlichen Kontrast zu erzeugen, welcher von dem Kamerasystem erkannt werden kann. Die Kamera nimmt über den Belastungszeitraum eine Reihe von Bildern auf,

die über eine Software (*Aramis*) miteinander verglichen werden. Durch die Entstehung lokaler Verschiebungen ist eine Berechnung der Dehnungswerte möglich [15]. Abbildung 4.5 zeigt den gesamten Aufbau mit Kamerasystem.

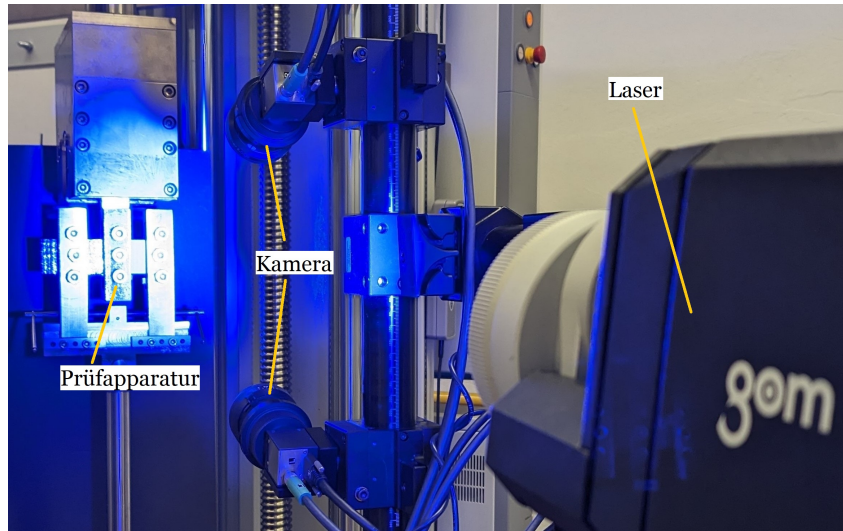


Abbildung 4.5: Messapparatur mit Kamerasystem

Die Probe wird mit bläulichem Licht beleuchtet, um einheitliche Lichtverhältnisse zu schaffen. Die beiden Kameras sind entsprechend ihrer Position für den Aufbau kalibriert und dürfen zwischen einzelnen Messungen nicht verschoben werden.

Die Kraftmessung erfolgt über eine 10 *kN*-Kraftmessdose, welche in einer Universalprüfmaschine von *Zwick* verbaut ist.

Für die Ermittlung der Schubmoduli werden Proben der Größe 40 *mm* x 160 *mm* so zugesägt, dass die Fasern längs zur längeren Seite der Probe verlaufen. Drei Proben je Konfiguration sind für die Messung vorgesehen.

Zur Ermittlung des Schubmoduls wird die Schubspannung in Abhängigkeit des Schubdehnung ermittelt. Die Steigung des linearen Teils dieses Graphen entspricht dem Schubmodul. Es gilt für kleine Scherwinkel [6]:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\tan \gamma_{12}} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} \quad (4.1)$$

Die Steigung im linear-elastischen Bereich wird über das Prinzip der kleinsten Quadrate ermittelt.

### 4.3.2 Zugprüfung

Die Steifigkeit und Festigkeit der Lamine werden getrennt von einander getestet. Bei der Ermittlung des E-Moduls ist eine 10 *kN*-Kraftmessdose erforderlich, welche für die Festigkeit nicht ausreichend ist. Getestet werden die Eigenschaften in und quer zur

Faserrichtung. Zunächst erfolgt die Messung für die Steifigkeit bis zu einer Dehnung von 0,3 % mit einer Geschwindigkeit von  $2 \frac{mm}{min}$ . Danach werden die bereits im elastischen Bereich belasteten Proben auf ihre Festigkeit in einer Universalprüfmaschine von *Instron Serie 3400* mit einer 100 kN-Kraftmessdose geprüft. Zur Ermittlung des E-Moduls wird das im vorherigen Abschnitt beschriebene Kamerasystem mit Bildkorrelation verwendet. Das Messmuster befindet sich dabei immer auf der Seite der Naturfaserlage. Der Zugversuch wird in Anlehnung an die Norm ISO 527-5 durchgeführt. Die Steigung des linear-elastischen Bereichs des Spannungs-Dehnungs-Diagramm entspricht dem E-Modul des Materials und wird nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate errechnet [6]. Die Ermittlung der Querkontraktionszahlen erfolgt über das Verhältnis der Längs- und Querdehnung [6, 10].

Abbildung 4.6 zeigt eine Zugprobe (20 mm x 250 mm) mit Messmuster, auf der in rot der Bereich gekennzeichnet ist, der für die Dehnungsmessung von Bedeutung ist. Die Ränder werden aufgrund von Randeffekten nicht betrachtet.

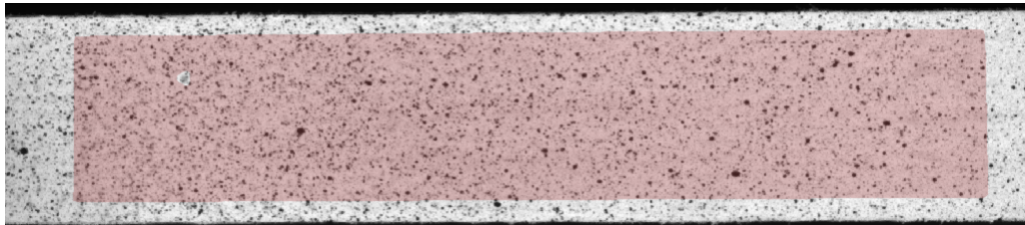


Abbildung 4.6: Bereich der durchgeführten Bildkorrelation

Die Aufleimer (20 mm x 50 mm) aus glasfaserverstärktem Kunststoff sind mit dem Kleber *Araldite AW4858/HW4858* auf den Proben aufgebracht. Für die Prüfung der Festigkeit werden diese aufgrund mangelnder Klebfestigkeit wieder entfernt und anschließend mit dem Kleber *Araldite 2011* erneut aufgeklebt. Dies hat zur Folge, dass die Messlänge für die Festigkeit lediglich 45 mm beträgt. Weitere Erläuterung sind in Abschnitt 7 (Fehlerbetrachtung) zu finden. Die Prüfgeschwindigkeit zur Ermittlung der Zugfestigkeit beträgt  $10 \frac{mm}{min}$ . Außerdem wird die Probenbreite aufgrund hoher erwarteter Festigkeiten von 25 mm (nach Norm) auf 20 mm reduziert, um für die Prüfmaschine zu hohe Bruchkräfte (<95 kN) zu vermeiden.

### 4.3.3 Garnzugprüfung

Für die Prüfung der Garnfestigkeit ist eine Modifikation der Prüfmaschine von *Zwick BZ1-MM 14450.ZW05* notwendig. Der Aufbau für die Garnzugprüfung ist in Abbildung 4.7 abgebildet. Die Testappartur ist an die Norm DIN EN ISO 2062 angelehnt.

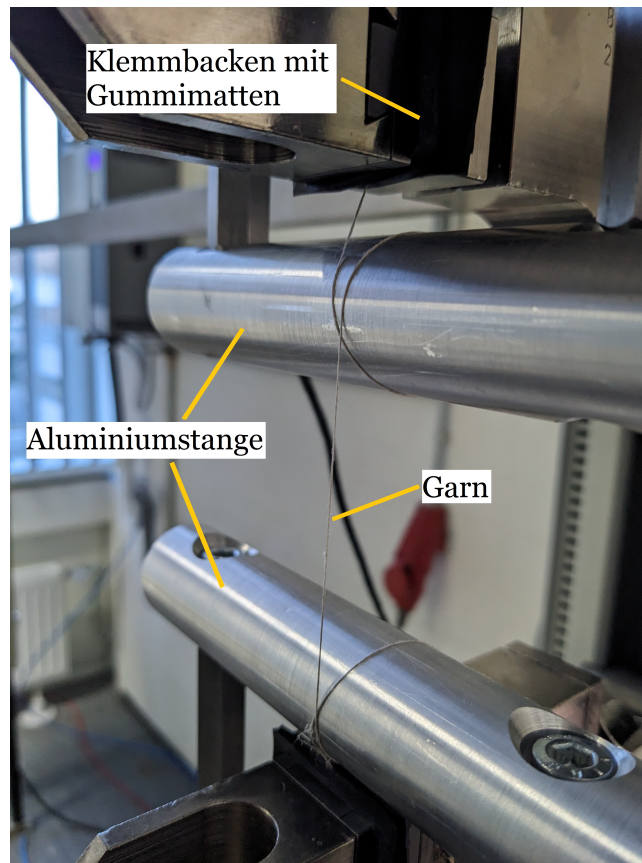


Abbildung 4.7: Aufbau des Garnzugversuchs

Das Garn wird zwischen zwei kleinen Gummimatten in den Klemmbacken befestigt. Die Gummimatten verhindern ein Rutschen des Garns, welches außerdem um eine Aluminiumstange mit einem Durchmesser von  $30\text{ mm}$  gewickelt wird. Die Reibung des Garns mit der Aluminiumstange wirkt unterstützend für die Klemmkraft, um das Risiko des Rutschens zu minimieren. Der Messbereich von etwa  $70\text{ mm}$  befindet sich zwischen den beiden Aluminiumstangen, bevor das Garn diese berührt. Getestet werden 13 Garne je Konfiguration. Die Garnfestigkeit wird üblicherweise in Bruchkraft pro Garnfeinheit angegeben [6]. Vor dem Start der Prüfung wird eine Vorkraft von  $2\text{ N}$  angefahren.

### 4.3.4 Druckfestigkeit

Im Allgemeinen gilt die axiale Druckprüfung von Faserverbunden aufgrund ihrer komplexen mechanische Versagensmechanismen als problematisch. Unterschiedliche Probegeometrien und Probenhalterungen liefern unterschiedliche Werte [6]. Deshalb soll die Messung der Druckfestigkeit primär dazu dienen die Druckeigenschaften der in dieser Arbeit betrachteten Lamine qualitativ einzuordnen, als aussagekräftige quantitative Ergebnisse zu ermitteln. Dies wird in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 14126 durchgeführt. Der verwendete Aufbau für die Druckprüfung ist in Abbildung 4.8 zu sehen.



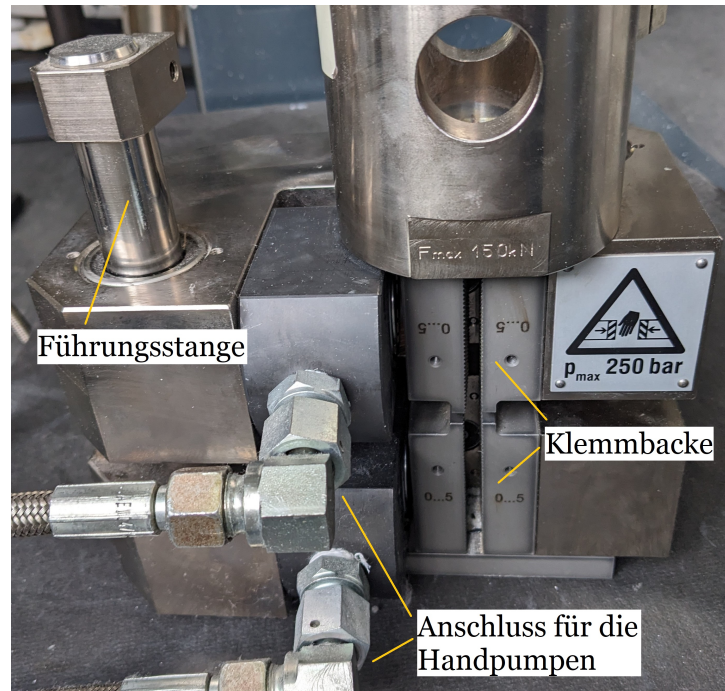


Abbildung 4.8: Aufbau zur Bestimmung der Druckfestigkeit

Die Krafteinleitung erfolgt über eine seitliche Klemmspannung auf die Aufleimer. Über zwei Handpumpen werden jeweils 100 *bar* als Klemmspannung auf die Proben aufgebracht. Eine Führungsstange dient dazu die Probe möglichst in einer Ebene zu belasten und ein knicken zu verhindern.

Die Prüflinge haben die Maßen 10 *mm* x 60 *mm* mit einer Messlänge von 10 *mm*. Getestet werden drei Proben je Konfiguration.

### 4.3.5 Drei-Punkt-Biegung

Die Biegeeigenschaften werden nach Norm DIN EN ISO 14125:2011-05 geprüft. Bei der Drei-Punkt-Biegung ist die maximale Belastung direkt unter dem Belastungspunkt. Der Verlauf der Normal- und Schubspannung über die Probendicke ist in Abbildung 4.9 zu sehen.

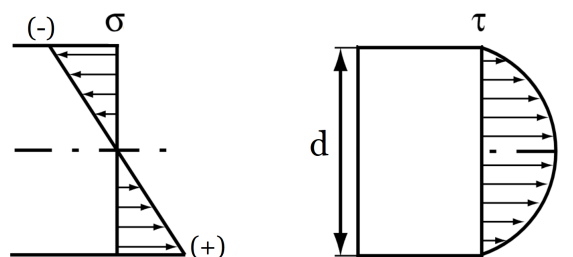


Abbildung 4.9: Normal- und Schubspannungsverlauf über die Dicke einer Biegeprobe, angepasst nach [1]

In der Neutralebene, also in der Mitte der Probenkörperdicke, ist die Normalspannung Null und die Schubspannung am höchsten. Die Normalspannung verläuft von der Belastungsseite als Druckspannung (negativ) linear über den Querschnitt zur Zugspannung (positiv). Am jeweiligen äußeren Rand ist die Normalspannung am höchsten. Aufgrund der unterschiedlichen Spannungen bedingt durch die Biegebelastung werden die asymmetrischen Proben so getestet, dass sich die Naturfaserlagen jeweils für eine Konfiguration auf der Zugspannungs- als auch auf der Druckspannungsseite befinden.

Abbildung 4.10 zeigt den Aufbau der Drei-Punkt-Biegung.

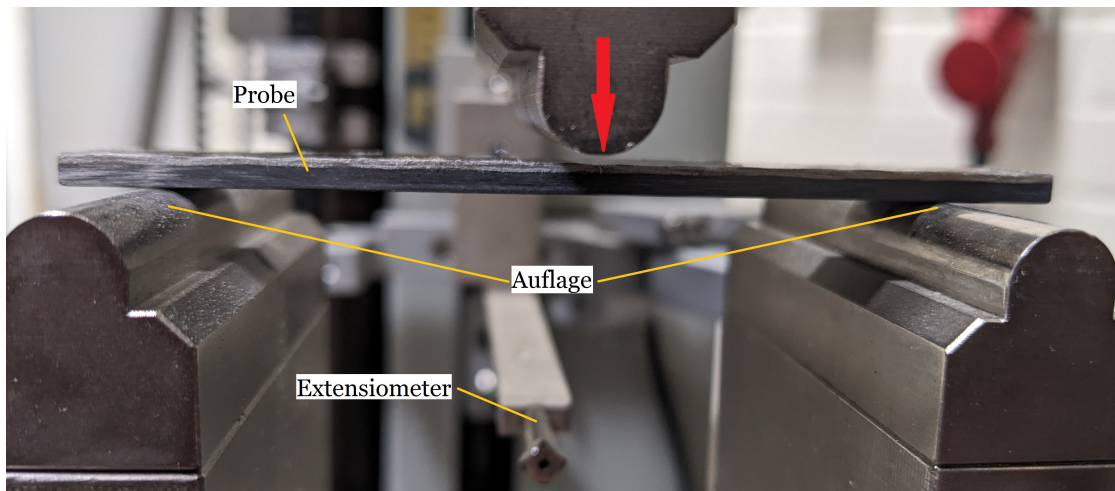


Abbildung 4.10: Aufbau der Drei-Punkt-Biegung

Der Auflagerabstand  $L$  für die Messungen beträgt  $80\text{ mm}$  und die Maßen der Proben sind  $100\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ . Unterhalb der Probe befindet sich ein Extensiomter, welcher die Durchbiegung der Probe aufnimmt. Um eine Dehnung von  $5\frac{\%}{\text{min}}$  zu erreichen, welche in der Norm vorgeschrieben ist, werden die Proben mit einer Prüfgeschwindigkeit von  $15\frac{\text{mm}}{\text{min}}$  belastet.

Die Biegespannung  $\sigma_{1b}$  wird über die aufgebrauchte Kraft  $F$ , die Breite des Probekörpers und die Dicke  $d$  des Probekörpers mit folgender Gleichung berechnet [16]:

$$\sigma_{1b} = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (4.2)$$

Für die Bestimmung des Biegemoduls wird die Steigung zwischen der Durchbiegung von  $0,05\%$  bis  $0,25\%$  ermittelt.

#### 4.3.6 Dynamisch mechanische Analyse

Bei der dynamisch mechanischen Analyse (DMA) wird ein Probekörper mit einer Wechselbeanspruchung belastet. Dabei ist es möglich die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Zeit, Temperatur und Frequenz zu untersuchen. Es können die viskoelastischen Eigenschaften von Kunststoffen näher charakterisiert werden. Bei dem Verfahren mit erzwungener Schwingung wird der Speicher- und Verlustmodul eines Materials ermittelt, mit denen das viskoelastische Verhalten beschrieben werden kann. Der Speichermodul ist ein Maß für die elastische Komponente eines Werkstoffs. Je höher der Speichermodul, desto steifer ist das Material. Der Verlustmodul hingegen erfasst die dissipierte Energie, also die Energie, die nicht mehr vollständig umgewandelt werden kann. Ein niedriger Verlustmodul deutet auf ein elastisches Materialverhalten hin. Der Speicher- und Verlustmodul sind materialspezifische Kennwerte, die von der angelegten Frequenz, den Messbedingungen und der Vorgeschichte der Probe abhängen. Der Verlustfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis von Verlustmodul zu Speichermodul und repräsentiert die Dämpfung des Systems [17].

In einer DMA sind unterschiedliche Belastungsfälle möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wird für einen Vergleich zur Drei-Punkt-Biegung Messungen mit dem Dual-Cantilever durchgeführt. Ähnlich wie bei der Drei-Punkt-Biegung wird die Probe auf Biegung belastet. Dafür wird der Probekörper an beiden Enden fest eingespannt und in der Mitte eine oszillierende Belastung angelegt. Die Messungen werden mit einer konstanten Frequenz von  $1\text{ Hz}$  in Abhängigkeit der Temperatur durchgeführt. Der Temperaturanstieg beträgt  $2\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ .

### 4.4 Laminatberechnungsprogramm eLamX

Der Lehrstuhl für Luftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Dresden entwickelt das quelloffene Programm eLamX<sup>2</sup> für Laminatberechnungen. In dem Programm sind unter anderem Festigkeitsanalysen, Berechnung der Ingenieurskonstanten, Deformationsanalysen und Vergleiche von Festigkeitskriterien möglich. Die Berechnungen erfolgen über die klassische Laminattheorie. Eine umfangreiche Einleitung zur Nutzung und Downloads des Programms ist auf der Website der TU Dresden zu finden [18]. Die strukturmechanische Analyse und Berechnungen der Lamine in dieser Arbeit werden mit Hilfe von diesem Programm durchgeführt.

---

## 5 Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Experimente dargestellt und näher beschrieben. Der darauf folgende Abschnitt 6 (Auswertung und Diskussion) fasst diese Ergebnisse zusammen und diskutiert sie unter Betrachtung der strukturmechanischen und prozesstechnischen Aspekten.

### 5.1 Faservolumengehalt

Die Faservolumenanteile sind in Abbildung 5.1 zusammengefasst. Die Konfigurationen sind unter dem entsprechendem Balken bildlich dargestellt. Jeder Strich stellt eine Lage des Laminats dar. Schwarz steht für eine Kohlefaserlage, hellgrün für eine Naturfaserlage und dunkelgrün entspricht einer kompaktierten Naturfaserlage. Dies gilt für alle weiteren Diagramme.

Die Gesamtdicke des Laminats wird über den Mittelwert aus fünf Messpunkten der sieben Zugproben je Konfiguration mit einem Messschieber ermittelt. Die unterschiedlichen Lagen im Hybridverbund werden nicht einzeln gemessen. Über das Verhältnis der Schichtdicken der Kohlefasern zu den Naturfasern aus den reinen Verbundplatten ( $\frac{2,94 \text{ mm}}{3,92 \text{ mm}} = 0,755$ ) wird anteilig die Dicke der Kohlefaser- bzw. der Naturfaserlagen des jeweiligen Hybridverbunds von dessen Laminatdicke abgeschätzt. Die Berechnung des Faservolumengehalts basiert auf Formel 2.1 mit den Dichten (CF  $1,76 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , NF  $1,35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ) und den Flächengewichten (CF  $300 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ , NF  $280 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ ) der Gelege.



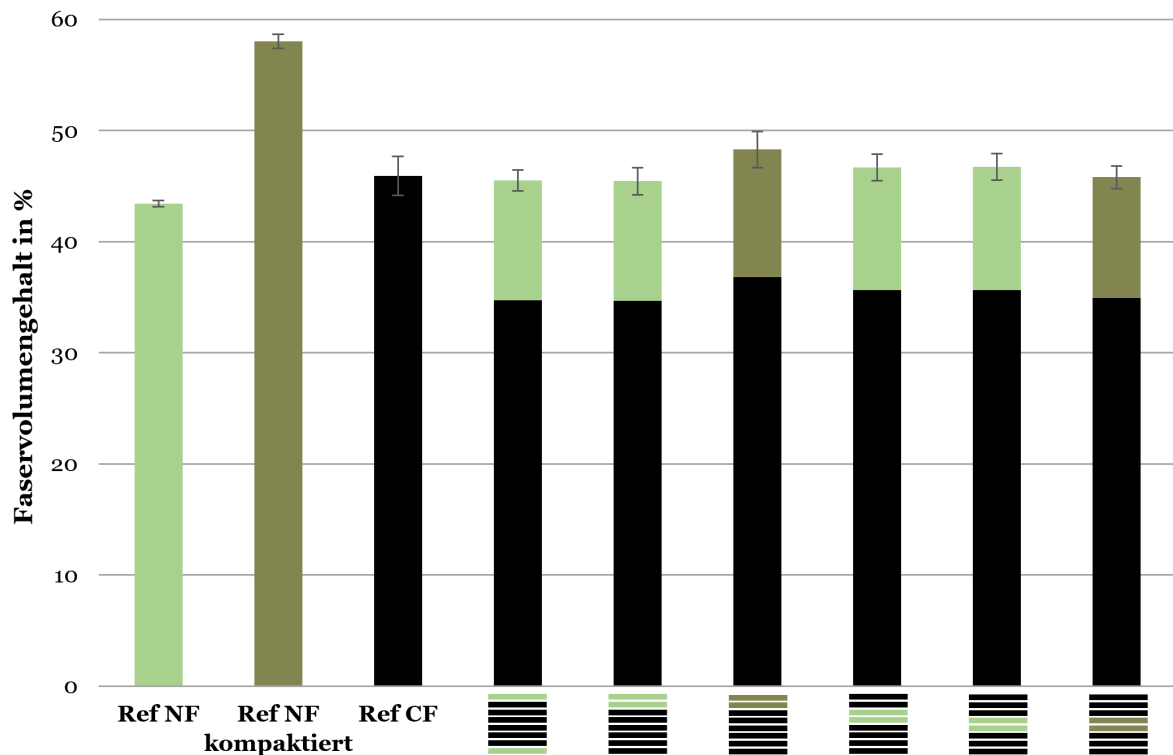


Abbildung 5.1: Faservolumenanteile

Die Vorkompaktierung der Naturfaserlagen des reinen Naturfaserverbunds erhöht den Faservolumenanteil um 14,6 %. Die Gesamtfaservolumenanteile der Hybridverbunde sind im Rahmen der Messabweichungen identisch mit dem des reinen Kohlefaserverbunds. Der Effekt der Kompaktierung auf den erhöhten Faservolumengehalt der Naturfasern geht bei den Hybridverbunden verloren, da dabei lediglich zwei Lagen kompaktiert werden. Bei allen Hybridverbunden beträgt der Anteil an Naturfasern etwa 11 % und der Anteil an Kohlefasern ca. 35 %.

## 5.2 Zugeigenschaften

### 5.2.1 Garnzugversuch

Die Garnfestigkeit wird ermittelt, um sicherzustellen, dass der Prozess der mechanischen Kompaktierung die Naturfasergelege nicht beschädigt. In Abbildung 5.2 sind die Festigkeiten der Garne in  $\frac{cN}{tex}$  dargestellt. Verglichen werden die vorkompaktierten Garne mit denen im ursprünglichen Zustand.

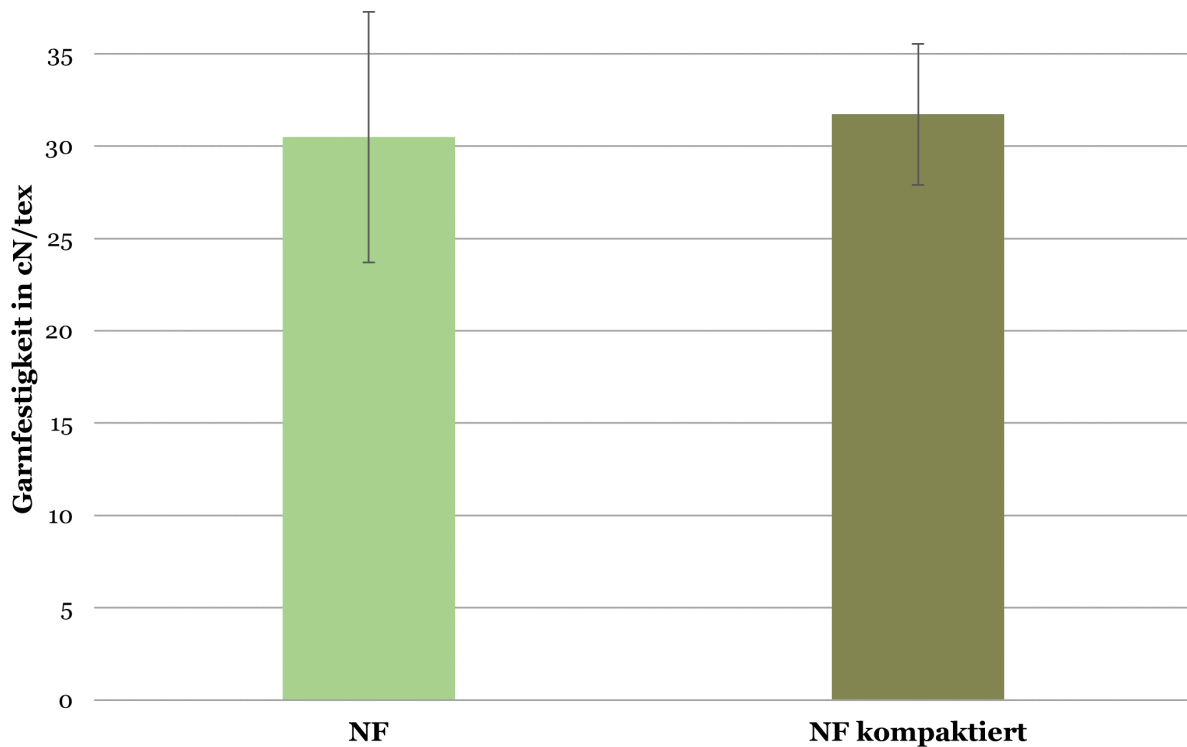


Abbildung 5.2: Garnfestigkeit

Die Festigkeiten beider Konfigurationen liegt bei etwas mehr als  $30 \frac{\text{cN}}{\text{tex}}$  und unterscheiden sich im Rahmen der Messabweichungen nicht. Daraus lässt sich schließen, dass die Fasern und Garne durch die Kompaktierung nicht beschädigt oder anderweitig negativ beeinflusst werden.

Naturfasern bringen als Naturprodukt von sich aus eine erhöhte Abweichung mit sich, wodurch in Kombination mit der kurzen freien Messlänge eine hohe Standardabweichung entsteht. Eine höhere Probenanzahl ( $>13$ ) sowie eine erhöhte freie Messlänge können präzisere Ergebnisse liefern.

Aufgrund fehlender Dehnungsmessung kann die Steifigkeit der Garne nicht ermittelt werden.

### 5.2.2 Auswirkungen von Luftblasen innerhalb des Laminats

Bei der anfänglichen Probenherstellung kam es zu Schwierigkeiten mit Blasenbildung innerhalb der Naturfaserlagen. Die Blasenbildung trat bei weiteren Infusionen jedoch nicht weiter auf. Der potentielle Einfluss von Luftblasen in den Naturfaserlagen wird hier dennoch über einen Zugversuch untersucht. Der Anteil an Luftblasen innerhalb des Naturfaserlaminats ist nicht quantitativ bestimmt. Abbildung 5.3 zeigt einen Ausschnitt der Zugproben auf denen qualitativ der Anteil an Luftblasen zu erkennen ist.



Abbildung 5.3: Naturfaserlamine links mit und rechts ohne Luftblasen

Die beiden Proben rechts im Bild weisen keinerlei Luftblasen innerhalb des Laminats auf. Hingegen ist der Anteil an Luftblasen der beiden Proben links im Bild augenscheinlich sehr hoch. Die Luftblasen sind ebenso über die Dicke des Verbunds verteilt.

In Abbildung 5.4 sind die Festigkeiten in Faserrichtung beider Lamine zum Vergleich dargestellt.

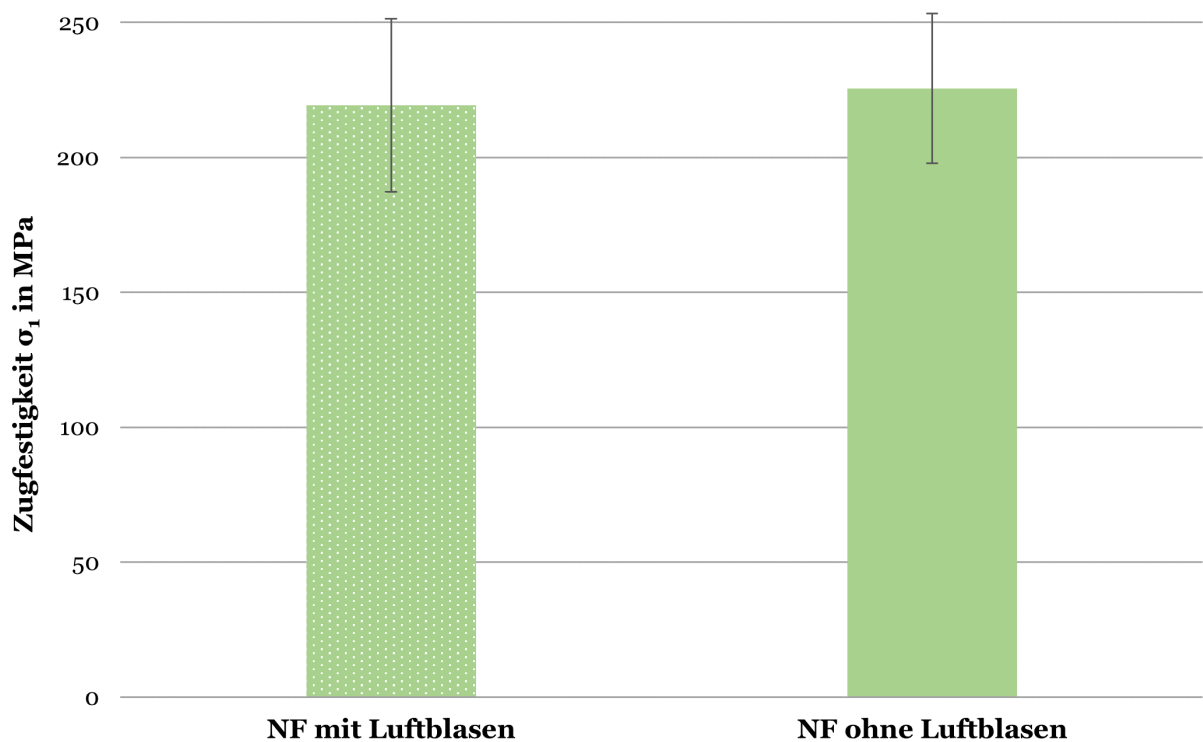


Abbildung 5.4: Vergleich beider Lamine

Die Festigkeiten beider Laminats unterscheiden sich im Rahmen der Messabweichung nicht und liegen bei ca. 225 MPa. Trotz, dass der Anteil an Luftblasen augenscheinlich relativ hoch ist, hat dies keinen negativen Einfluss auf die Festigkeit. Der Faservolumengehalt des Laminats mit Luftblasen ist 6 % höher als der des Laminats ohne Luftblasen. Aufgrund der hohen Standardabweichung ist im Rahmen dieser Messung dennoch keine Verschlechterung festzustellen.

### 5.2.3 E-Modul

Abbildung 5.5 zeigt den E-Modul in Faserrichtung der einzelnen Laminats.

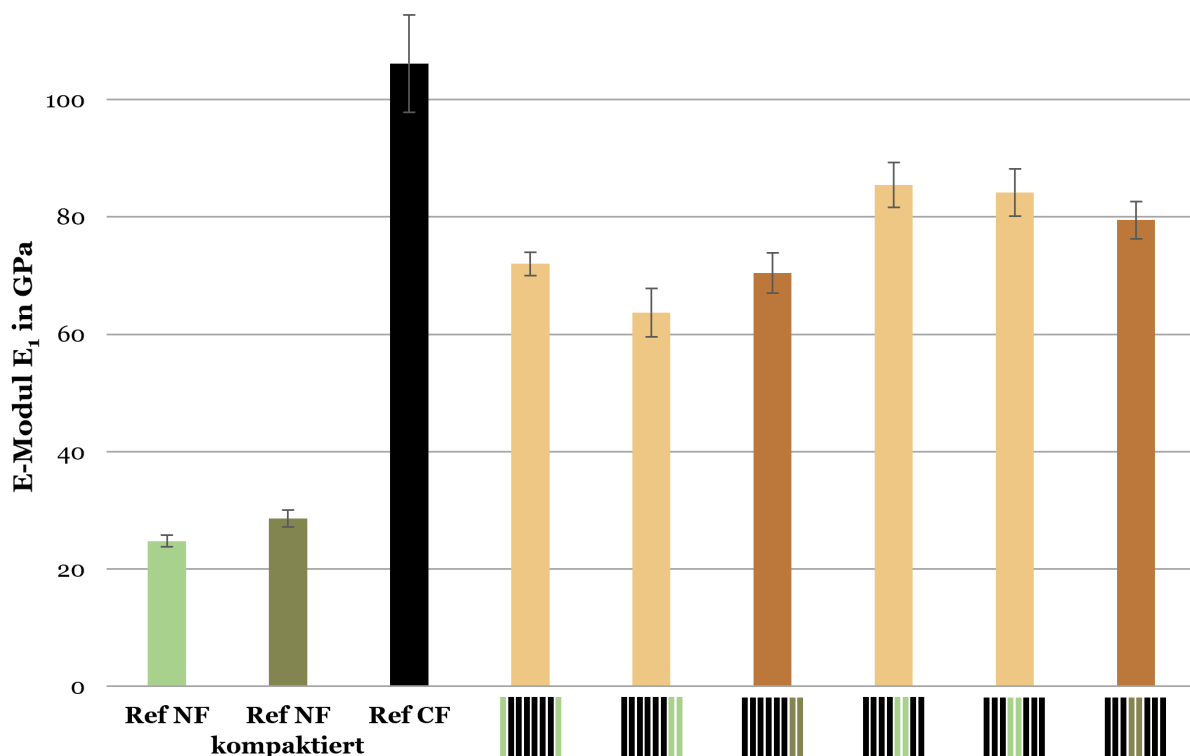


Abbildung 5.5: E-Moduli in Faserrichtung

Der E-Modul des reinen Kohlefaserlaminats ist mit 106,2 GPa deutlich höher als die der reinen Naturfaserlaminats. Der Faserverbund mit den vorkompaktierten Naturfaserlagen hat eine um ca. 15% gesteigerte Steifigkeit im Vergleich zum Verbund mit den unkompaktierten Naturfasern. Dies ist auf die Erhöhung des Faservolumengehalts zurückzuführen.

Die Steifigkeiten der Hybridlaminats sind geringer als die des reinen Kohlefaserlaminats. Sind die beiden Naturfaserlagen auf der Außenseite, so ist die Steifigkeit im Vergleich zu den anderen Hybridlaminats niedriger. Dies kann über die Messmethodik begründet werden. Durch das Kamerasystem mit digitaler Bildkorrelation wird lediglich die Dehnung der äußersten Schicht aufgezeichnet. Durch den Steifigkeitssprung zwischen Natur- und

Kohlefaser wird bei niedrigerer Spannung und höherer Dehnung der äußersten Lage im Laminat ein verringerter E-Modul gemessen. Dies wird über die klassische Laminattheorie in Abschnitt 6 näher betrachtet.

Die Kompaktierung der Naturfaserlagen hat für die Hybridverbunde keinen messbaren Effekt auf die Steifigkeit. Der Anteil an Naturfasern innerhalb eines Hybridlaminats ist zu gering. Der relative Anstieg des E-Moduls der Naturfasern ist im Gegensatz zu der hohen Steifigkeit der Kohlefasern zu niedrig, als dass dieser messbar wäre.

In Abbildung 5.6 sind die Verteilungen der Dehnung in Zugrichtung (Längsdehnung) von drei Konfigurationen dargestellt. Diese Proben werden in Faserrichtung belastet. Die Bilder stellen die identischen Belastungszeitpunkte dar und sind somit vergleichbar.

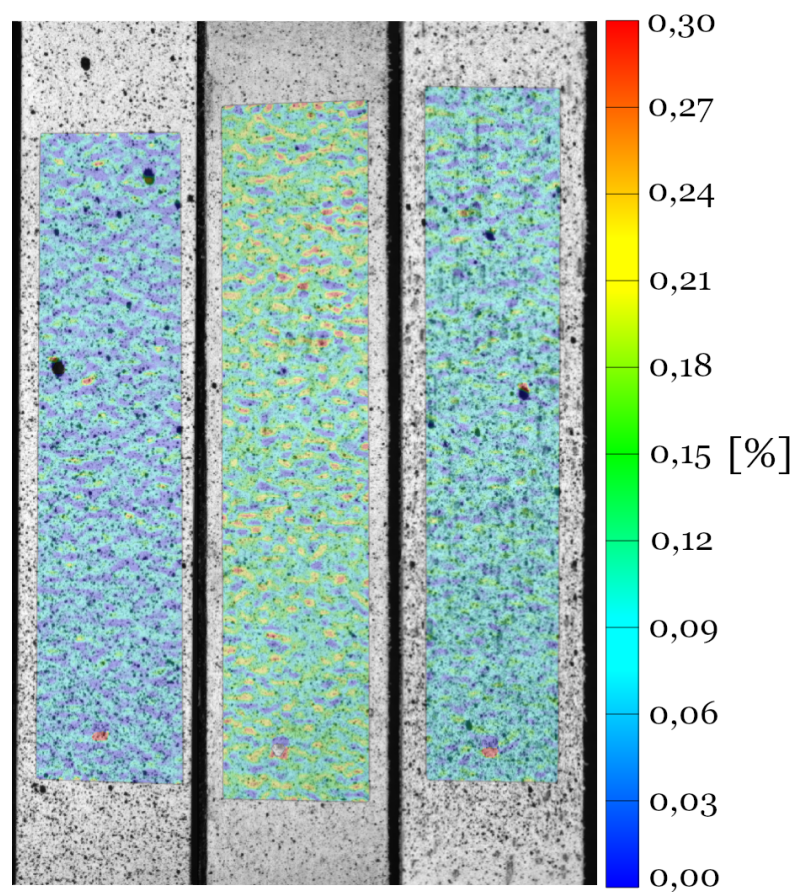


Abbildung 5.6: Längsdehnungsverteilungen: links das Kohlefaserlaminat, mittig das Naturfaserlaminat, rechts das asymmetrische Hybridlaminat mit beiden Naturfaserlagen außen

In der Mitte einer jeweiligen Probe ist ein Rechteck zu sehen, in dem die Dehnungen aufgezeichnet werden. Dieses wird von Hand in das Programm eingefügt. Die äußeren Bereiche werden dabei nicht betrachtet, um eventuelle Randeffekte, welche Artefakte hervorrufen können, zu vermeiden. Die Farbskala rechts im Bild gibt an, wie hoch die Dehnung an entsprechender Stelle der Probe ist. Trotz, dass bei den drei Proben ein

Rauschen in der Dehnungsverteilung zu erkennen ist, kann dies als eine homogene Verteilung angesehen werden. Zum Einen tritt das Rauschen regelmäßig über die gesamte Fläche auf und zum Anderen sind die Dehnungsunterschiede innerhalb einer Probe sehr gering.

In der folgenden Abbildung 5.7 sind die Steifigkeiten quer zur Faserrichtung dargestellt.

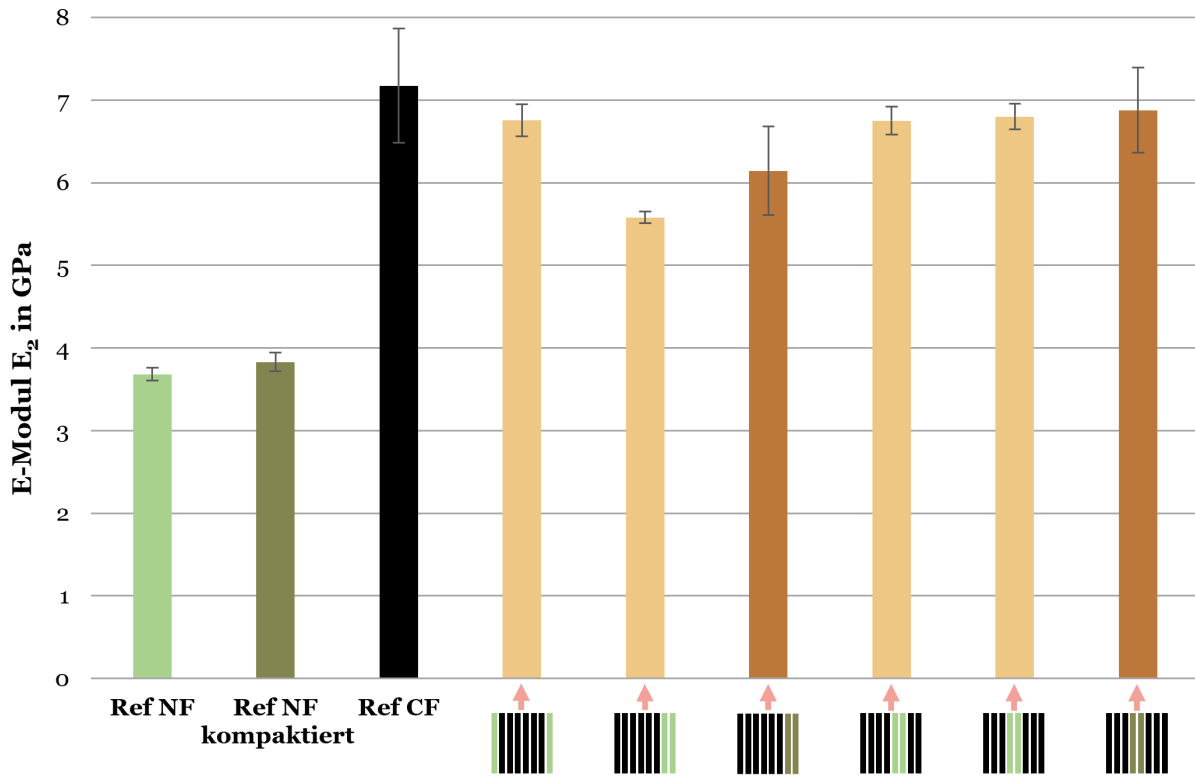


Abbildung 5.7: E-Moduli quer zur Faserrichtung

Die Steifigkeit des Kohlefaserlaminats ist mit  $7,2 \text{ GPa}$  etwa doppelt so hoch wie die mit rein Naturfaserlagen. Die Naturfasern haben einen geringen Einfluss auf die Steifigkeit quer zur Faserrichtung, da der E-Modul der Naturfaserlaminats lediglich  $0,7 \text{ GPa}$  höher als der der Matrix ( $3,0 \text{ GPa}$ , entnommen aus dem Datenblatt [19]) ist. Entsprechend hat die Kompaktierung mit einer Erhöhung des Faservolumengehalts von  $42,4 \%$  auf  $56,5 \%$  ebenso einen geringen Einfluss auf den E-Modul. Die Steifigkeiten der Hybridlaminats sind ähnlich der des reinen Kohlefaserlaminats. Sind beide Naturfaserlagen jedoch auf der Außenseite des asymmetrischen Laminats, so wurde eine niedrigere Steifigkeit festgestellt. Dieser Effekt ist hier jedoch nicht so stark ausgeprägt wie für den E-Modul in Faserrichtung, da die Eigenschaften quer zur Faserrichtung matrixdominant sind.

### 5.2.4 Querkontraktionszahl

Die folgende Abbildung 5.8 zeigt die Messergebnisse für die Querkontraktionszahl  $\nu_{12}$  der einzelnen Konfigurationen. Der erste Index steht dabei für die Belastungsrichtung und der Zweite für die Richtung der Kontraktion.

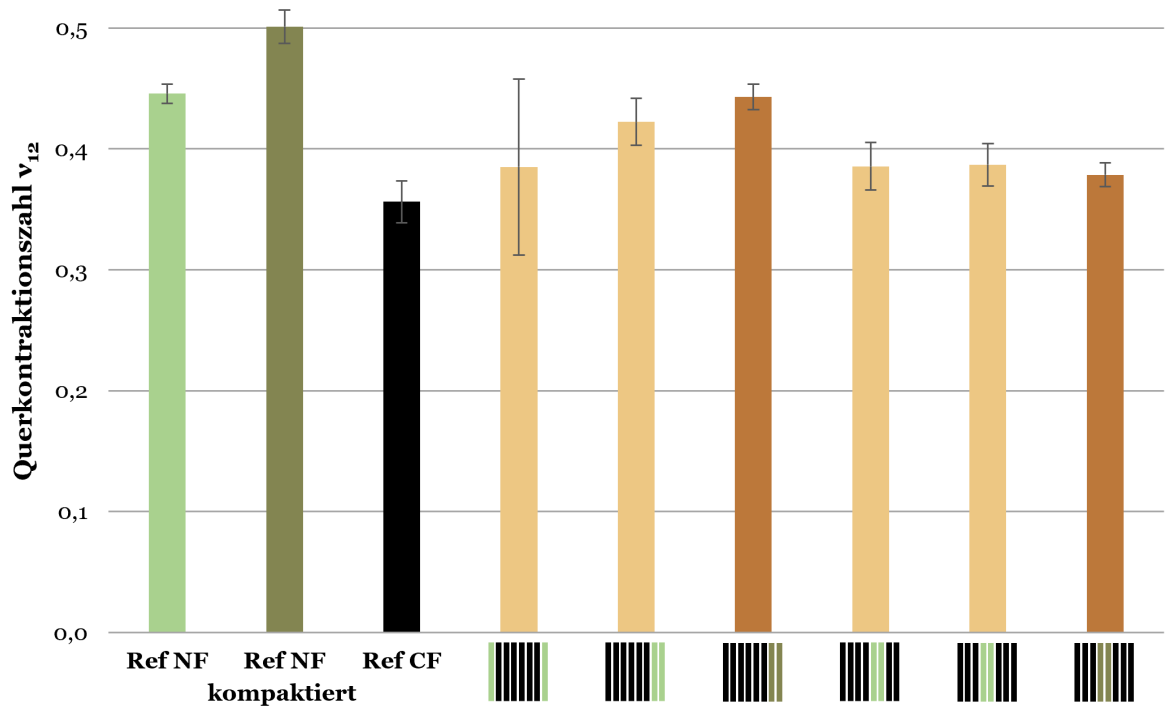


Abbildung 5.8: Querkontraktionszahlen  $\nu_{12}$

Die Lamine mit Naturfasern weisen eine höhere Querkontraktionszahl auf als das Kohlefaserlaminat. Die Kompaktierung der Naturfaserlagen im reinen Naturfaserverbund erwirkt eine Erhöhung von ca. 0,05 für die Querkontraktionszahl  $\nu_{12}$ . Der Einfluss der Kompaktierung für die Hybridverbunde ist deutlich geringer. Die Hybridlamine mit Kohlefasern als äußerste Lage haben eine ähnliche Querkontraktion wie der reine Kohlefaserverbund. Liegen die Naturfaserlagen auf der Außenseite, so nähert sich die Querkontraktionszahl den Referenzlaminaten mit Naturfasern an. Dies ist ebenso, wie bereits bei den Steifigkeitswerten, auf die Dehnungsmessung der äußersten Schicht zurückzuführen. Dies sorgt vor allem bei Hybridverbunden dafür, dass nicht das ganze Laminat abgebildet wird.

Die hohe Standardabweichung des symmetrischen Hybridlaminats mit den äußeren Naturfaserlagen ist auf die inhomogene Querdehnungsverteilung zurückzuführen. Dies ist im Vergleich mit dem reinen Natur- und Kohlefaserlaminat in Abbildung 5.9 dargestellt.



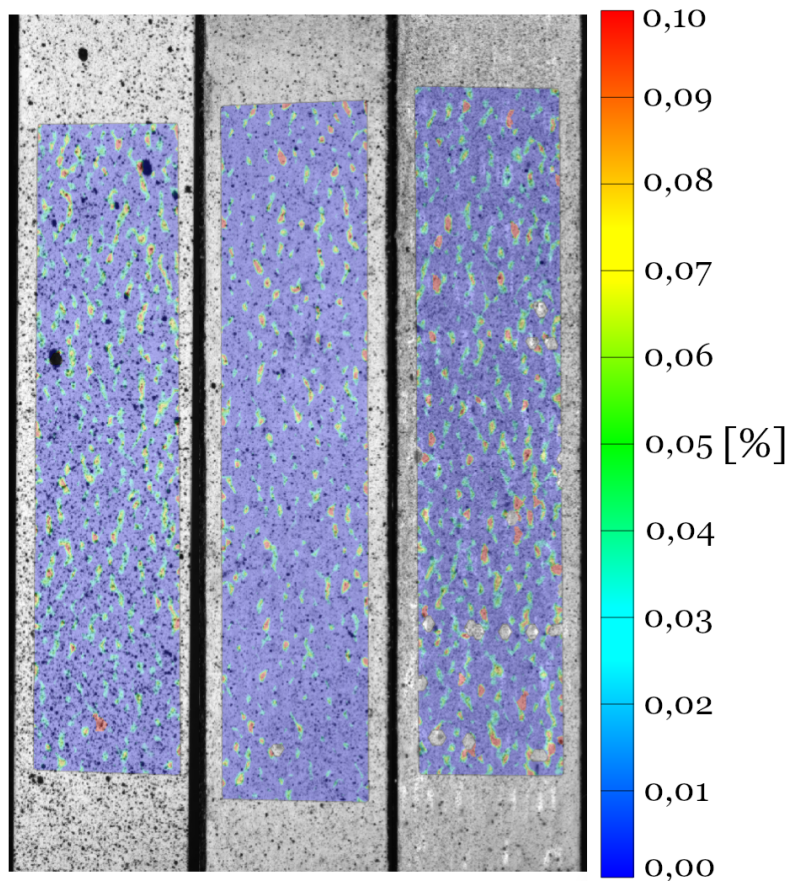


Abbildung 5.9: Querdehnungsverteilung: links das Kohlefaserlaminat, mittig das Naturfaserlaminat, rechts das symmetrische Hybridlaminat mit den Naturfasergelegen als äußerste Lagen

Für das Kohlefaser- und das Naturfaserlaminat ist hier im Rahmen des Grundrauschens der Messung von einer homogenen Querdehnungsverteilung auszugehen. Auf der Probe mit jeweils einer Naturfaserlage außen sind vermehrt unregelmäßige Bereiche höherer Dehnung (in rot dargestellt) zu erkennen. Dadurch wird die Messung der Dehnung beeinflusst und führt zu einer erhöhten Standardabweichung innerhalb dieser Konfiguration.



In Abbildung 5.10 sind die Ergebnisse der Querkontraktionszahlen  $\nu_{21}$  dargestellt.

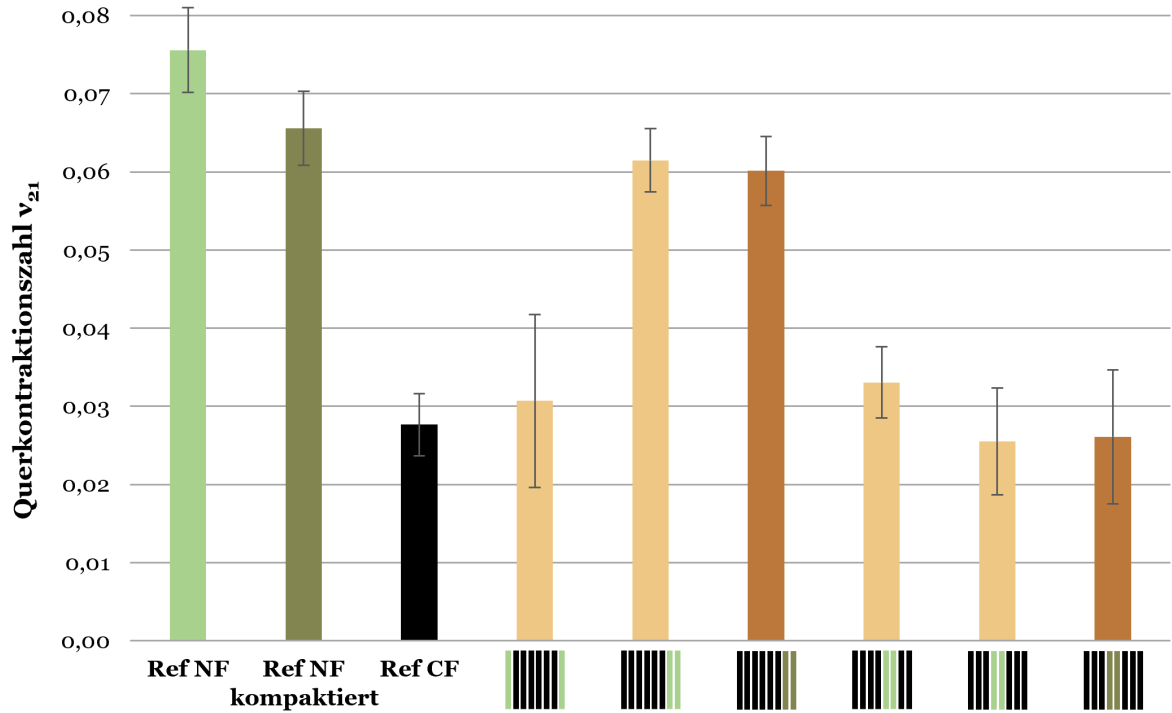


Abbildung 5.10: Querkontraktionszahlen  $\nu_{21}$

Bei der Belastung quer zur Faserrichtung ist die Kontraktion in Faserrichtung der Naturfaserverbunde deutlich höher als die der Kohlefaserverbunde. Während die Hybridverbunde, bei denen die Kohlefaserlagen die Naturfaserlagen ummanteln, eine ähnliche Querkontraktion wie die Kohlefaserreferenz aufweisen, haben die beiden asymmetrischen Lamine mit den Naturfasern auf der Außenseite eine starke Tendenz zur Querkontraktion der Naturfaserreferenz. Einzig die symmetrische Konfiguration mit einer einzelnen äußeren Naturfaserlage weist diese Tendenz nicht auf. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Kraftübertragung von den Kohlefasern zu einer einzelnen Naturfaserlage ausreicht, um die entsprechende Dehnung mit abzubilden. Eine zweite äußere Naturfaserlage sorgt dafür, dass die Eigenschaften dieses Materials und nicht des gesamten Laminats gemessen werden.

Im Allgemeinen sind hier die Standardabweichungen höher als bei den Querkontraktionszahlen  $\nu_{12}$ , da die Werte der Querdehnung sehr klein sind und dadurch an die Grenzen der Messmethodik gelangen.

### 5.2.5 Zugfestigkeit

In Abbildung 5.11 sind die Zugfestigkeiten in Faserrichtung zusammengefasst. Die Festigkeit des reinen Kohlefaserlaminats ist jedoch nicht repräsentativ, da nur eine einzige Probe bis zum Bruch getestet werden konnte. Bei sechs anderen Proben ist es zu einem Versagen der Aufleimer gekommen. Weitere Erläuterungen dazu sind in Abschnitt 7 (Fehlerdiskussion) zu finden. Die Festigkeit wird basierend auf einer Probe pessimistisch auf  $1400\text{ MPa}$  geschätzt. Festigkeitsvergleiche mit diesem Laminat werden nur als grobe Tendenz angesehen.

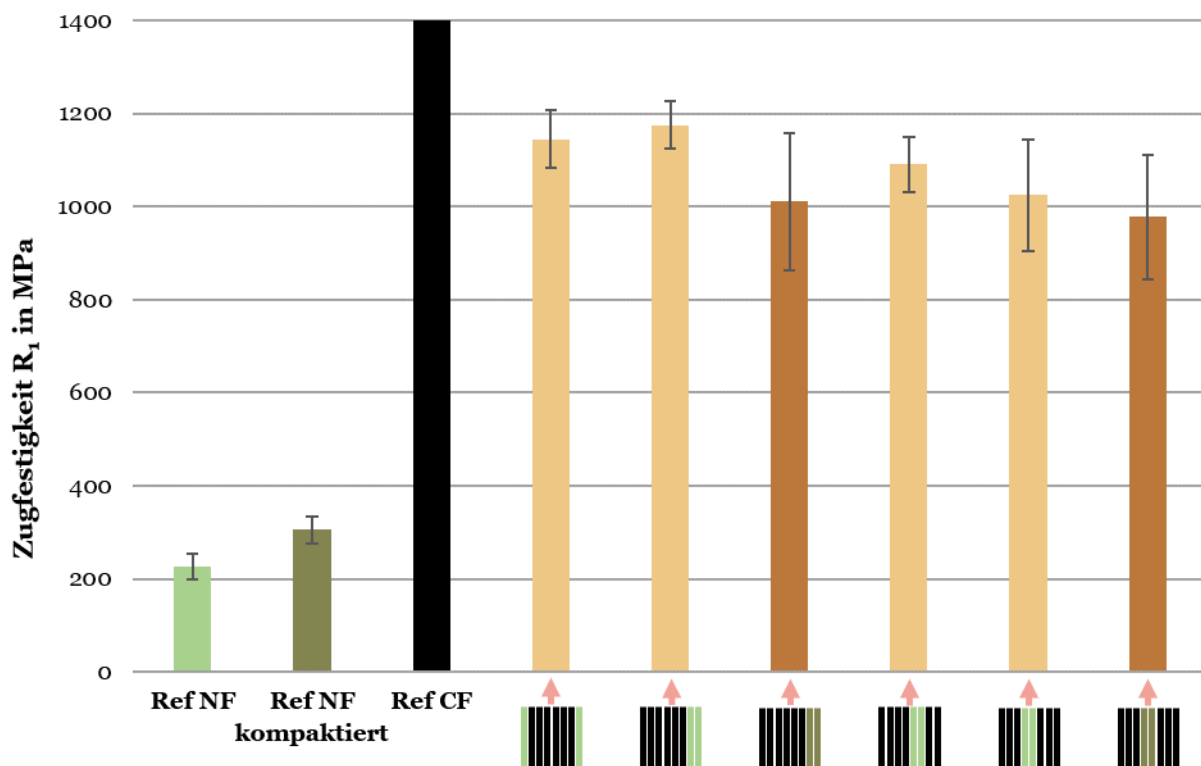


Abbildung 5.11: Zugfestigkeiten in Faserrichtungen

Die durch die Kompaktierung erwirkte Erhöhung des Faservolumengehalts kommt hier mehr zum Tragen, da die Festigkeit in Faserrichtung der Naturfasern deutlich höher ist als die der Matrix. Daraus resultiert eine um 36% gesteigerte Festigkeit bei dem Laminat mit kompaktierten Naturfasern. Das Kohlefaserlaminat hat mit grob  $1400\text{ MPa}$  eine deutlich höhere Festigkeit als die Naturfaserverbunde. Die Festigkeiten der Hybridverbunde scheinen etwas niedriger als die Kohlefaserreferenz zu sein. Aufgrund der teils hohen Standardabweichungen ist zwischen den einzelnen Konfigurationen der Hybridlamine kein Unterschied festzustellen. Auch die Kompaktierung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit. Der relative Anteil an Naturfasern und die durch die kompaktierten Naturfasern erhöhte Festigkeit im Hybridverbund ist zu gering, als dass ein Unterschied messbar ist.

Nahezu alle Proben der Naturfaserverbunde haben mit gleicher Bruchart, wie in Abbildung 5.12 zu sehen, versagt.

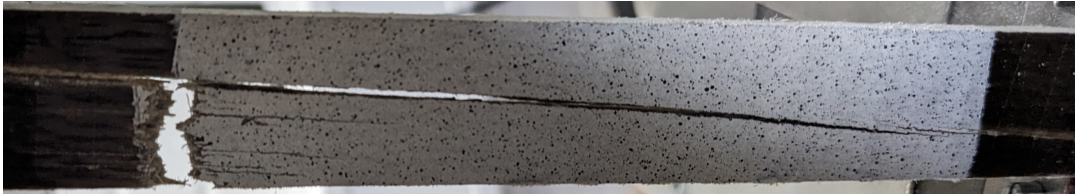


Abbildung 5.12: Bruchbild eines reinen Naturfaserverbunds nach einem Zugversuch in Faserrichtung

Ein Teil der Probe versagt lateral bis sich der Bruch entlang der Faserrichtung ausbreitet.

Hingegen kam es bei den Proben aller Hybridverbunde zu einem reinen lateralen Bruch. Über 80 % der Brüche erfolgten nahe oder innerhalb der Einspannung, an der aufgrund der hohen Zugkräfte ( $>70\text{ kN}$ ) hohe Klemmkkräfte nötig sind und dort Spannungsspitzen entstehen. Im Allgemeinen werden diese Art von Brüchen kritisch betrachtet und als ungültig angesehen, da die Proben potentiell nicht die wahre Festigkeit widerspiegeln können. Im Rahmen der Zugfestigkeitsmessungen wird dieser Einfluss vernachlässigt. Ein Beispiel solch eines Bruches ist in Abbildung 5.13 zu sehen.

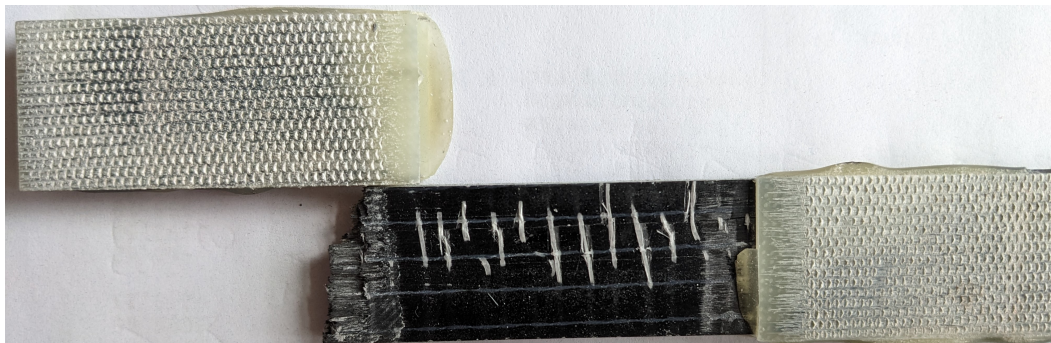


Abbildung 5.13: Bruchbild eines Hybridverbunds nach einem Zugversuch in Faserrichtung

Die Probe in der Abbildung ist ein paar Millimeter innerhalb der Einspannung lateral gebrochen.

In Abbildung 5.14 sind die Ergebnisse der Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung zusammengefasst.

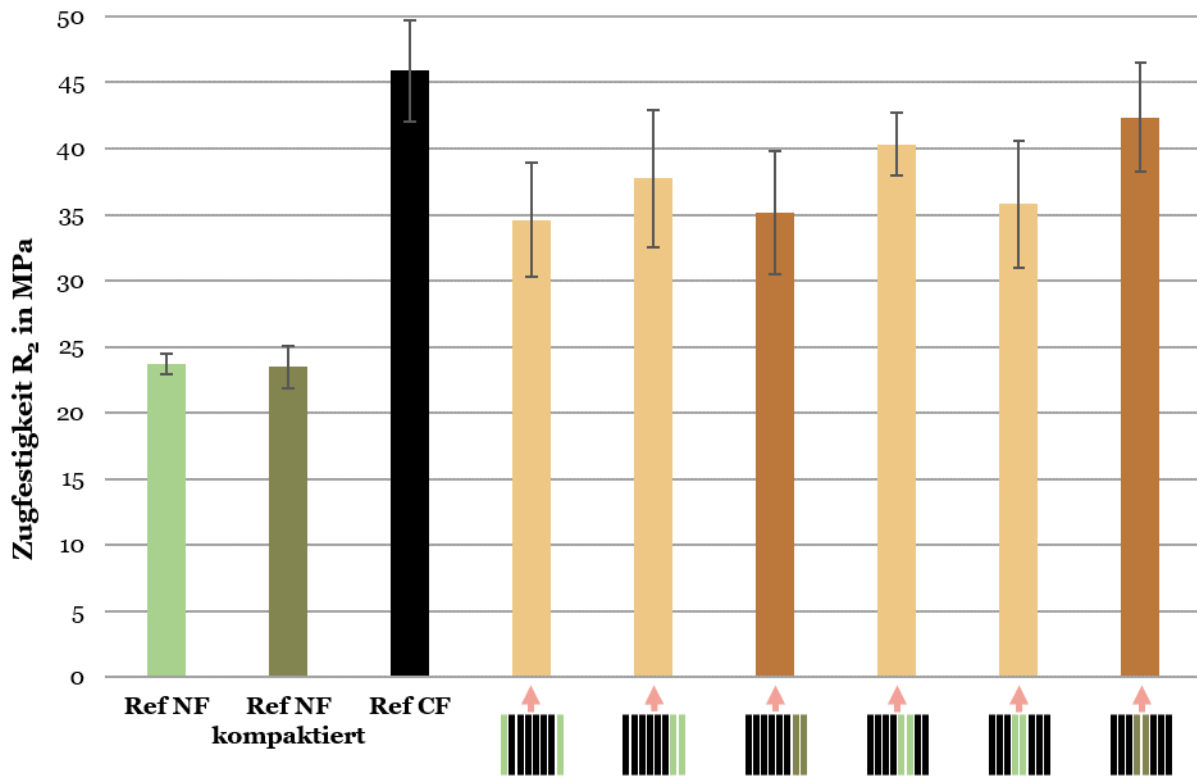


Abbildung 5.14: Zugfestigkeiten quer zur Faserrichtung

Die Festigkeit quer zur Faserrichtung ist matrixdominant, weshalb zwischen den beiden Naturfaserlaminaten kein Unterschied festzustellen ist. Hingegen ist die Festigkeit des Kohlefaserlaminats in etwa doppelt so hoch wie der der Naturfaserverbunde. Die Hybridverbunde weisen eine niedrigere Festigkeit als die Kohlefaserreferenz auf. Zwischen den einzelnen Konfigurationen der Hybridlaminare ist im Rahmen der Messunsicherheit kein Unterschied feststellbar.

### 5.3 Schubmodul

Abbildung 5.15 zeigt die Ergebnisse für den Schubmodul der einzelnen Konfigurationen.

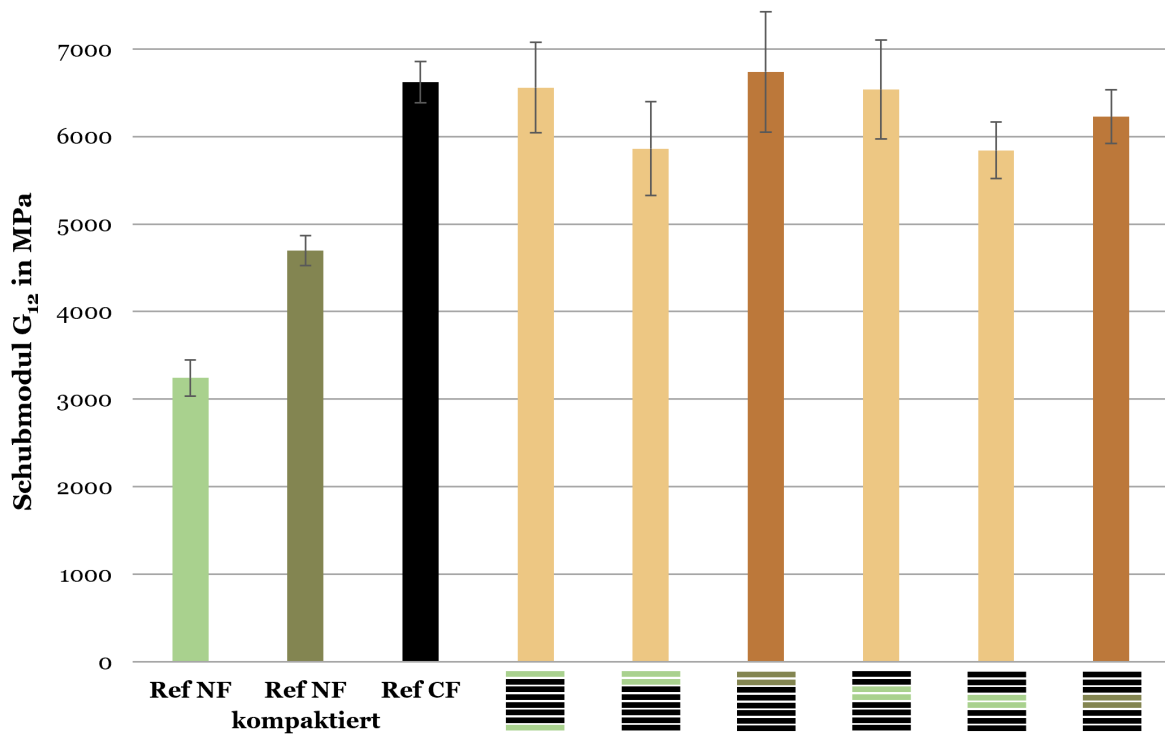


Abbildung 5.15: Schubmodul der Lamine

Der Schubmodul des Kohlefaserlaminats ist mit  $6620 \text{ MPa}$  in etwa doppelt so hoch wie der des reinen Naturfaserlaminats. Die Kompaktierung der Naturfasern erwirkt hier eine Erhöhung von 45%. Darüber hinaus weist der Verbund mit rein Kohlefaserlagen eine ca. doppelt so hohe Schubsteifigkeit im Gegensatz zum reinen Naturfaserverbund auf. Im Rahmen der Messabweichungen ist bei den Hybridverbunden kaum eine Verringerung des Schubmoduls im Vergleich zum Kohlefaserlaminat zu erkennen. Um eine aussagekräftige Tendenz zwischen den Hybridlaminaten mit vorkompaktierten und nicht vorkompaktierten Naturfasern zu erkennen, ist eine höhere Probenanzahl notwendig.

### 5.4 Druckfestigkeit

In Abbildung 5.16 sind die Druckfestigkeiten einzelner Konfigurationen dargestellt. Der Fokus soll dabei weniger auf den quantitativen, sondern vielmehr auf den qualitativen Ergebnissen liegen. Getestet werden lediglich drei Proben je Konfiguration, sodass die quantitativen Ergebnisse nicht die gewünschte Aussagekraft haben.

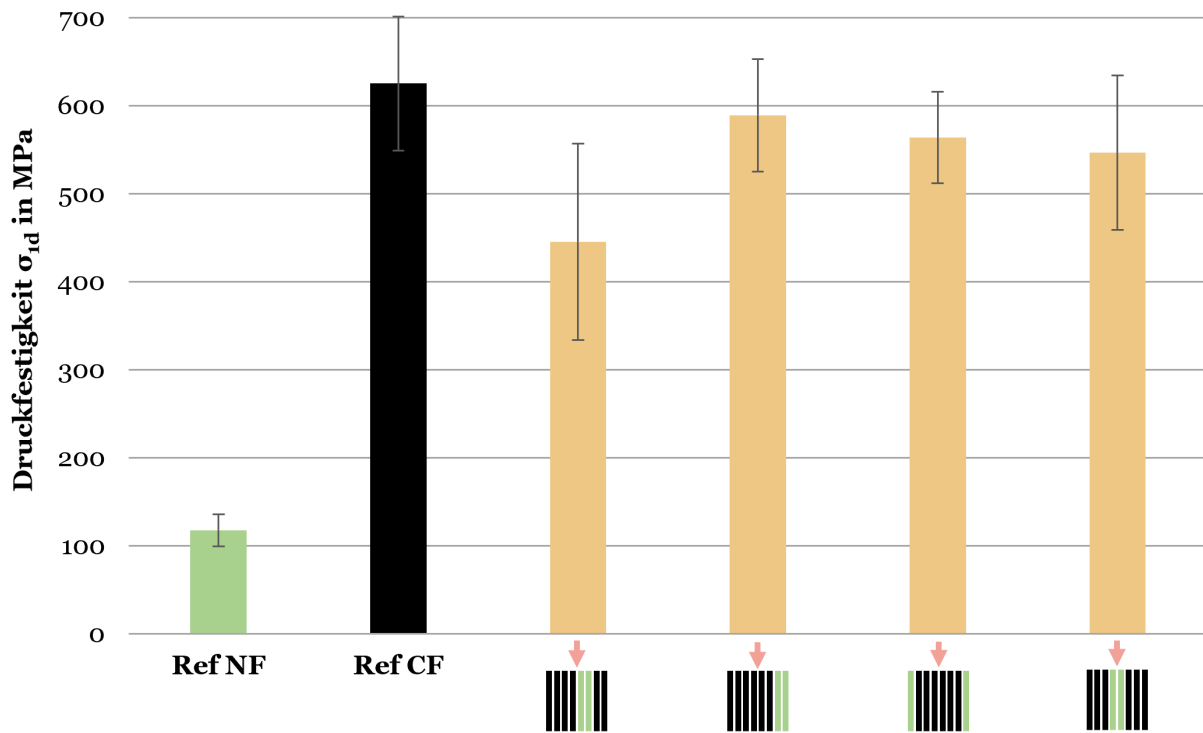


Abbildung 5.16: Druckfestigkeit

Die Druckprüfung zeigt, trotz der potentiell schwierigen Reproduzierbarkeit, dass die Druckfestigkeit des Kohlefaserlaminats deutlich höher als die des Naturfaserlaminats ist. Außerdem liegt die Druckfestigkeit der Hybridlamine näher an dem des Kohlefaserlaminats als an dem reinen Naturfaserlaminat.

Die Prüfung der Druckfestigkeit soll dabei helfen die Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegung besser zu verstehen. Dafür werden die Bruchbilder der Druckprüfung mit den Bruchbildern der Biegeprüfung verglichen.

In Abbildung 5.17 stellt zwei Bruchbilder der Hybridlaminare dar.

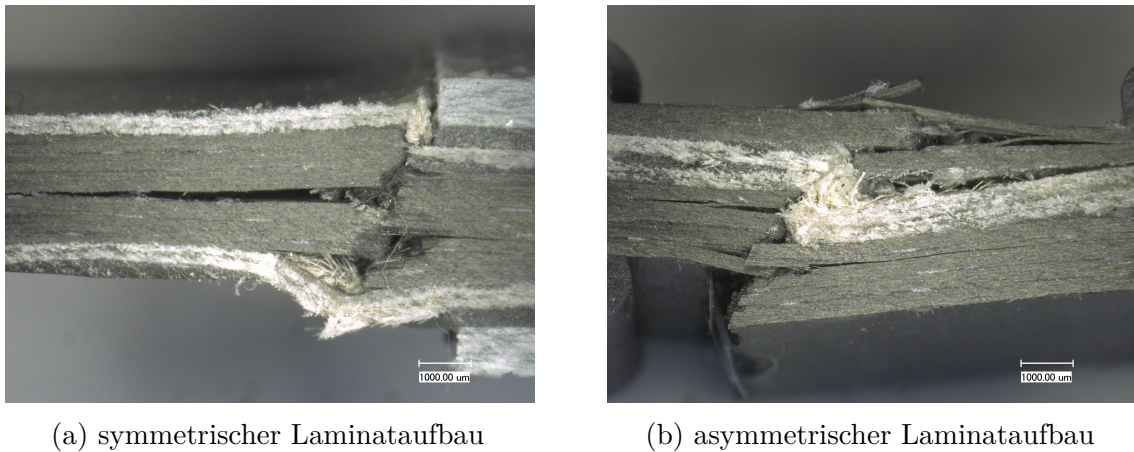


Abbildung 5.17: Bruchbilder der Druckprüfung

In dem linken Bild ist der asymmetrische Laminataufbau mit den Naturfasern auf der Außenseite zu sehen. Das rechte Bild zeigt die Konfiguration mit asymmetrischen Lagenaufbau, bei dem zwei Kohlefaserlagen auf der Außenseite sind.

Bei dem symmetrischen Laminat ist ein Schubknicken in der Ebene zu erkennen. Dabei schieben sich die bei dem Bruch entstehenden Enden gegeneinander nach außen in die gleiche Richtung. Dies ist vor allem bei der unteren Naturfaserlage zu erkennen. Das Laminat wird dabei etwas aufgespalten.

Das asymmetrische Laminat weist ein Schubknicken aus der Ebene heraus auf. Mit dem Faserbruch schiebt sich die linke Hälfte nach oben und es entsteht ein Versatz. Der asymmetrische Aufbau begünstigt mit schwächeren Naturfasern auf der einen Seite dieses Versagen. Das Laminat wird hier weniger aufgespalten.

Die Bruchbilder deuten aufgrund des Schubknickens auf ein Stabilitätsversagen hin. Ein solches Stabilitätsversagen tritt bei Faserverbunden oft durch Faserwelligkeiten auf, die für ein lokales Ausbeulen sorgen. Nachbarbereiche müssen dadurch zusätzliche Kräfte übernehmen. Es entsteht ein Knicken, welcher zu einem großflächigen Bruch führen kann. Dieser Mechanismus ist in Abbildung 5.18 schematisch dargestellt [1, 10].

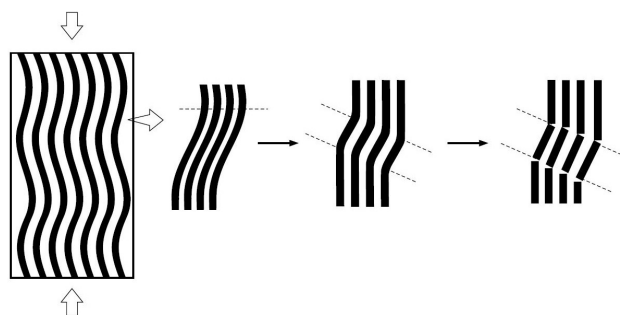


Abbildung 5.18: Mechanismus der Entstehung einer Knickebene [1]

## 5.5 Drei-Punkt-Biegung

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegung zusammengefasst. Dabei wird der Einfluss der Position der Naturfaserlagen und der Einfluss der Kompaktierung gesondert betrachtet. Wie in den vorherigen Abbildungen stellen die Bilder in der Legende die einzelnen Konfigurationen dar. Die asymmetrischen Laminats wurden so getestet, dass sich die Naturfaserlagen jeweils auf der Zugspannungsseite als auch auf der Druckspannungsseite befinden.

### 5.5.1 Einfluss der Position der Naturfaserlagen

In den folgenden drei Abbildungen 5.19, 5.20 und 5.21 sind die Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegung mit Biegemodul, Bruchdehnung und Biegefestigkeit mit dem Fokus auf die Position der Naturfaserlagen zusammengefasst.

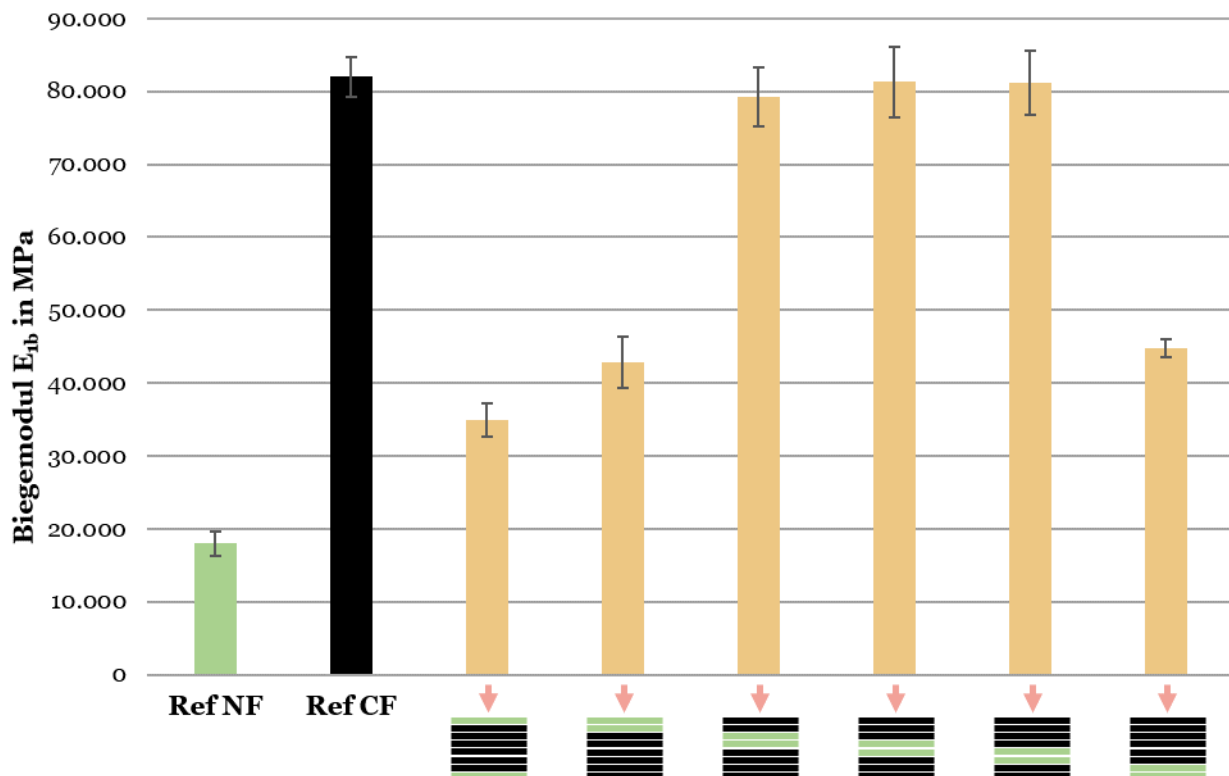


Abbildung 5.19: Biegemodul mit Fokus auf die Position der Naturfaserlagen

Die hohe Steifigkeit der Kohlefasern im Gegensatz zu den Naturfasern spiegelt sich ebenso in dem Biegemodul wider. Der Biegemodul der Naturfasern erreicht mit  $17961 \text{ MPa}$  nur ca. ein Fünftel des Biegemoduls des Kohlefaserlaminats. Bei den Hybridlaminaten mit den Naturfaserlagen in der Mitte des Laminats wird die Biegesteifigkeit im Gegensatz zur Referenz nicht negativ beeinflusst. Befinden sich die Naturfaserlagen jedoch außen, also



dort, wo die Zug- bzw. Druckspannung am höchsten ist, verringert sich die Biegesteifigkeit deutlich.

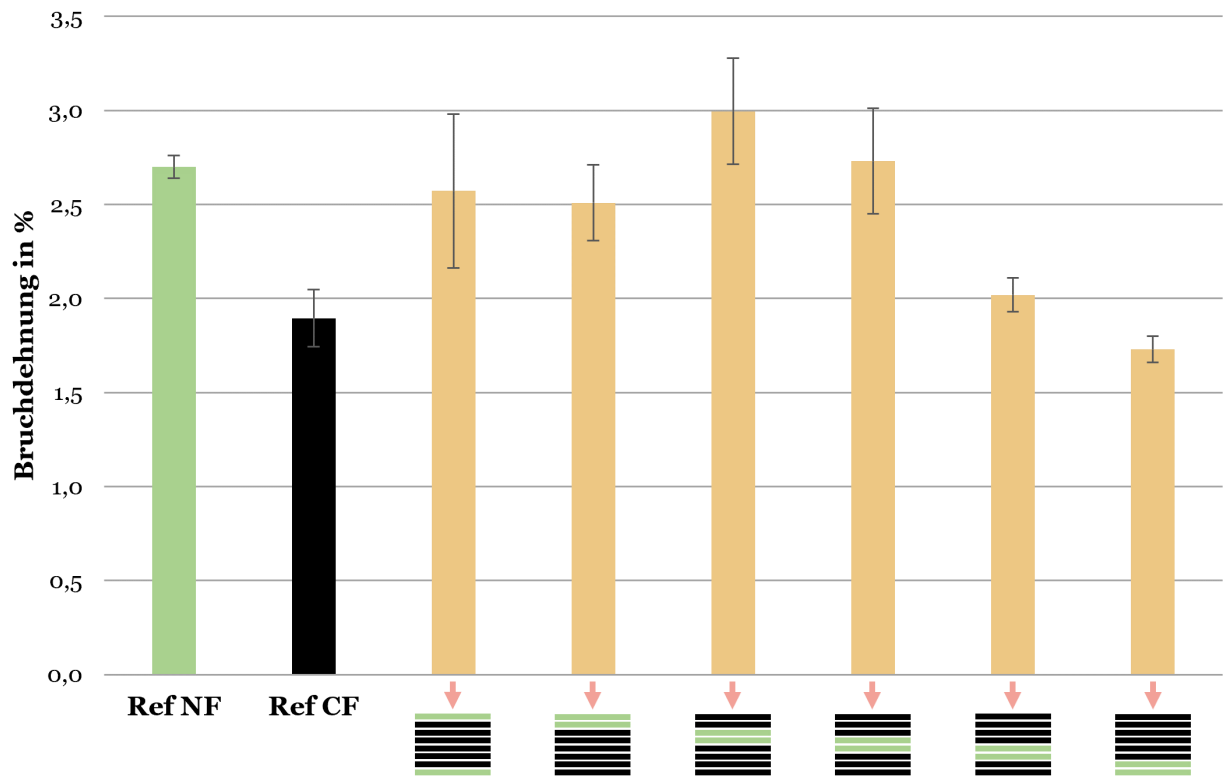


Abbildung 5.20: Bruchdehnung mit Fokus auf die Position der Naturfaserlagen

Die Bruchdehnung des naturfaserverstärkten Laminats ist mit 2,7 % höher als die des Kohlefaserlaminats (1,89 %). Die Werte der ersten vier Hybridlaminats (im Diagramm von links nach rechts) können aufgrund der teilweise hohen Standardabweichung auf einem Niveau mit der Naturfaserreferenz angesehen werden. Sind die beiden Naturfaserlagen bei den Hybridverbunden auf der Seite der Druckspannung, so erhöht sich die Bruchdehnung im Vergleich zur Kohlefaserreferenz. Liegen die Naturfasern auf der Seite der Zugspannungen, so nähert sich die Bruchdehnung an die der Kohlefaserreferenz. Die Lagen, die an der Stelle der höchsten Druckspannung liegen, bestimmen die Bruchdehnung. Dies deutet vermehrt auf ein Druckversagen hin.

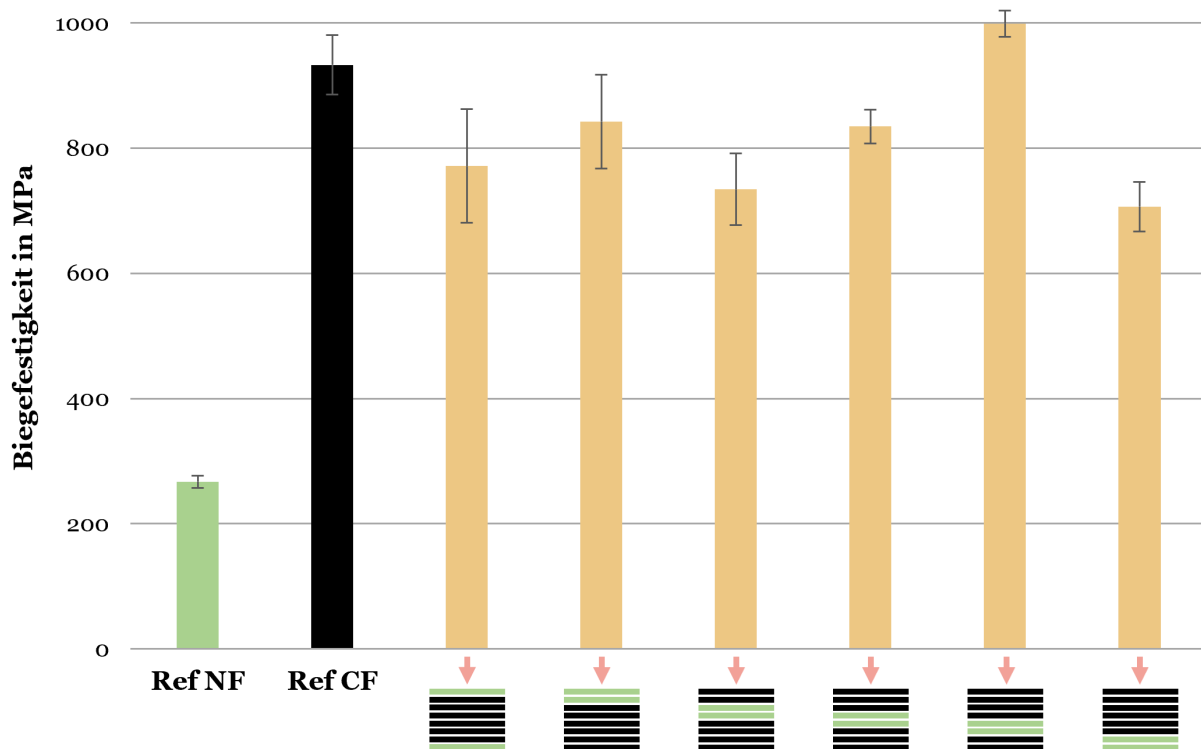


Abbildung 5.21: Biegefestigkeit mit Fokus auf die Position der Naturfaserlagen

Die Biegefestigkeit des Kohlefaserlaminats ist, wie auch bei der Zug- und Druckfestigkeit, deutlich höher als die des Naturfaserverbunds. Im Allgemeinen weisen die Hybridverbunde eine Tendenz auf, dass die Festigkeit etwas unterhalb der der Kohlefaserreferenz liegt. Lediglich die Konfiguration mit den Naturfaserlagen an Position fünf und sechs (betrachtet von oben nach unten) zeigt eine leichte Steigerung in der Festigkeit im Gegensatz zu anderen Konfigurationen der Hybridlamine. In Anbetracht der Biegesteifigkeit und der Biegefestigkeit weist diese Konfiguration die höchsten Kennwerte in der Biegeprüfung auf. Für die Festigkeit ist es entscheidend, dass sich auf der Druckseite ausschließlich Kohlefasern befinden. Im vorherigen Abschnitt wurde bereits die deutlich geringere Druckfestigkeit des Naturfaserlaminats im Vergleich zum Kohlefaserlaminat aufgezeigt. Außerdem ist es für die Biegesteifigkeit von Bedeutung keine Naturfasern als äußerste Lage zu positionieren.

In den folgenden Abbildungen sind die Bruchbilder der Konfigurationen dargestellt und werden mit den entsprechenden Festigkeitswerten verglichen.

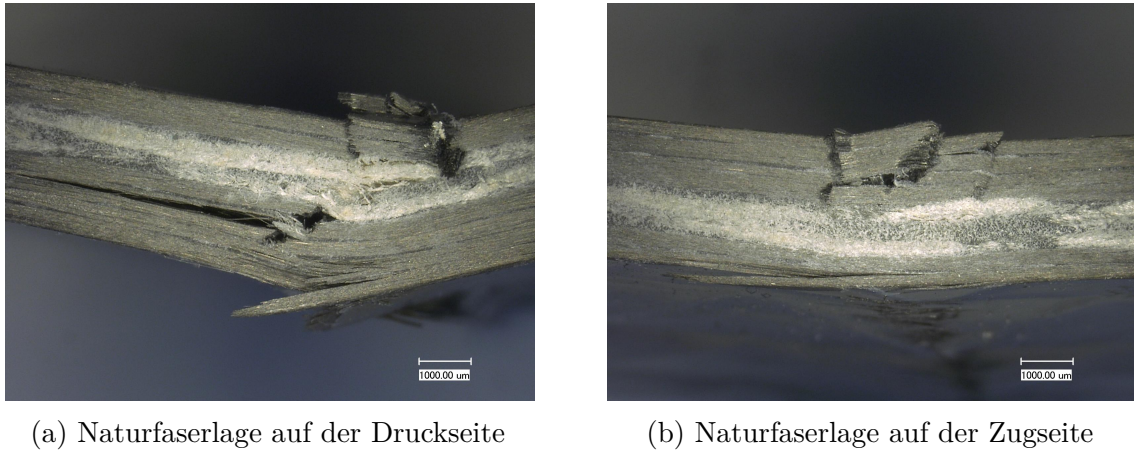


Abbildung 5.22: Bruchbilder der Biegeprüfung des asymmetrischen Laminataufbaus

Liegen die Naturfaserlagen auf der Druckseite so entsteht ein Druckversagen mit einem Ausbeulen der Naturfasern in Richtung der Zugseite. Der Bruch setzt sich als Delamination zwischen Kohlenfaserlagen auf der Zugseite fort. Dieses Bruchverhalten ist vergleichbar mit dem Schubknicken aus der Ebene der Druckprüfung von dieser Konfiguration (Abbildung 5.17). Befinden sich ausschließlich Kohlefaserlagen auf der Druckseite, entsteht lediglich ein Druckversagen der Kohlefaserlagen ohne eine sich ausbreitende Delamination.

Abbildung 5.23 zeigt beispielhaft den Verlauf der Biegespannung in Abhängigkeit der Biegedehnung jeweils einer Probe je Konfiguration. Die ausgewählten Proben können als repräsentativ für die jeweilige Konfiguration angesehen werden.

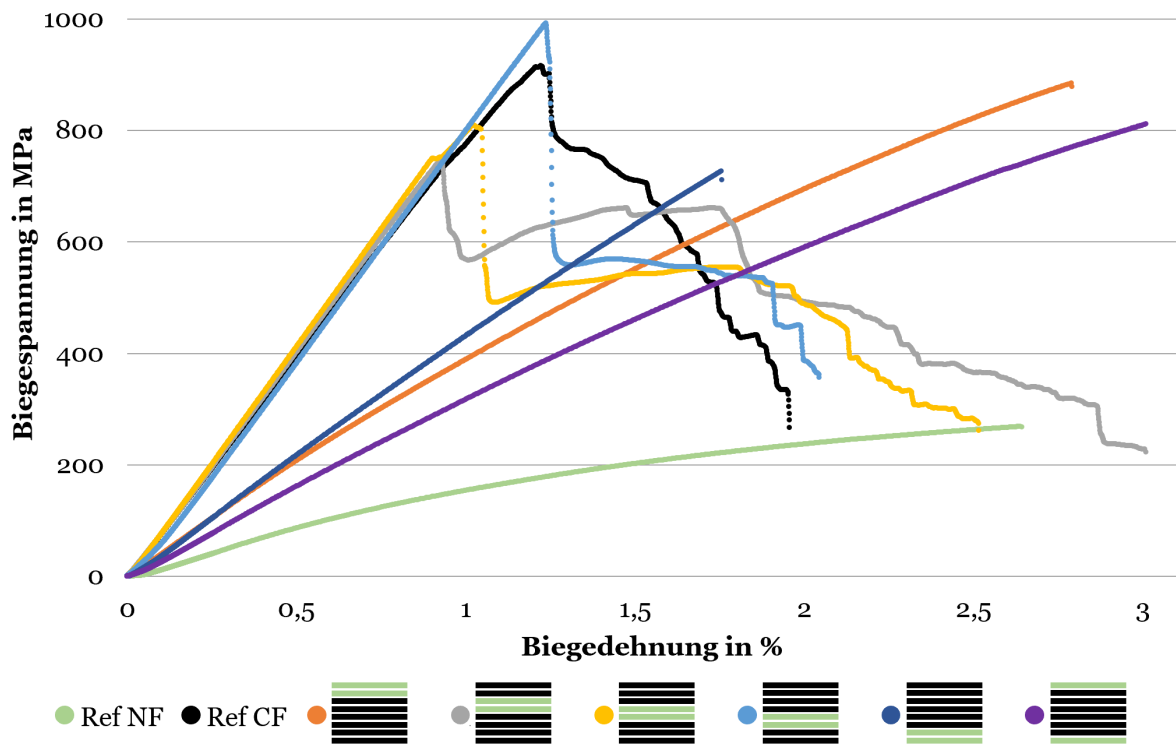


Abbildung 5.23: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeprüfung mit Fokus auf die Position der Naturfaserlagen

Der Verlauf der Biegespannung in Abhängigkeit der Biegedehnung spiegelt die Gruppierungen der Ergebnisse wider. Die Graphen der Hybridverbunde mit den Naturfasern in der Mitte (gelb, grau und hellblau) weisen die höchste Steigung und entsprechender Steifigkeit auf. Sind die Fasern auf der Außenseite des Verbunds (orange, dunkelblau und violett) ist die Steigung geringer.

Die in Abbildung 5.22 beobachtete Delamination kann anhand des erneuten Kraftanstiegs (Verlauf in grau) nach dem ersten Spannungsabfall bei knapp 1 % Biegedehnung erklärt werden. Bei einer Dehnung von ca. 1,8% breitet sich der Riss in Form einer Delamination weiter aus und es kommt zu einem zweiten Spannungsabfall. Dieses Verhalten ist typisch für eine interlaminaire Rissausbreitung [20].

### 5.5.2 Einfluss der Kompaktierung

In den folgenden Abbildungen 5.24, 5.25 und 5.27 sind die Biegeeigenschaften mit Biegemodul, Bruchdehnung und Biegefestigkeit mit Fokus auf dem Einfluss der Kompaktierung zusammengefasst.

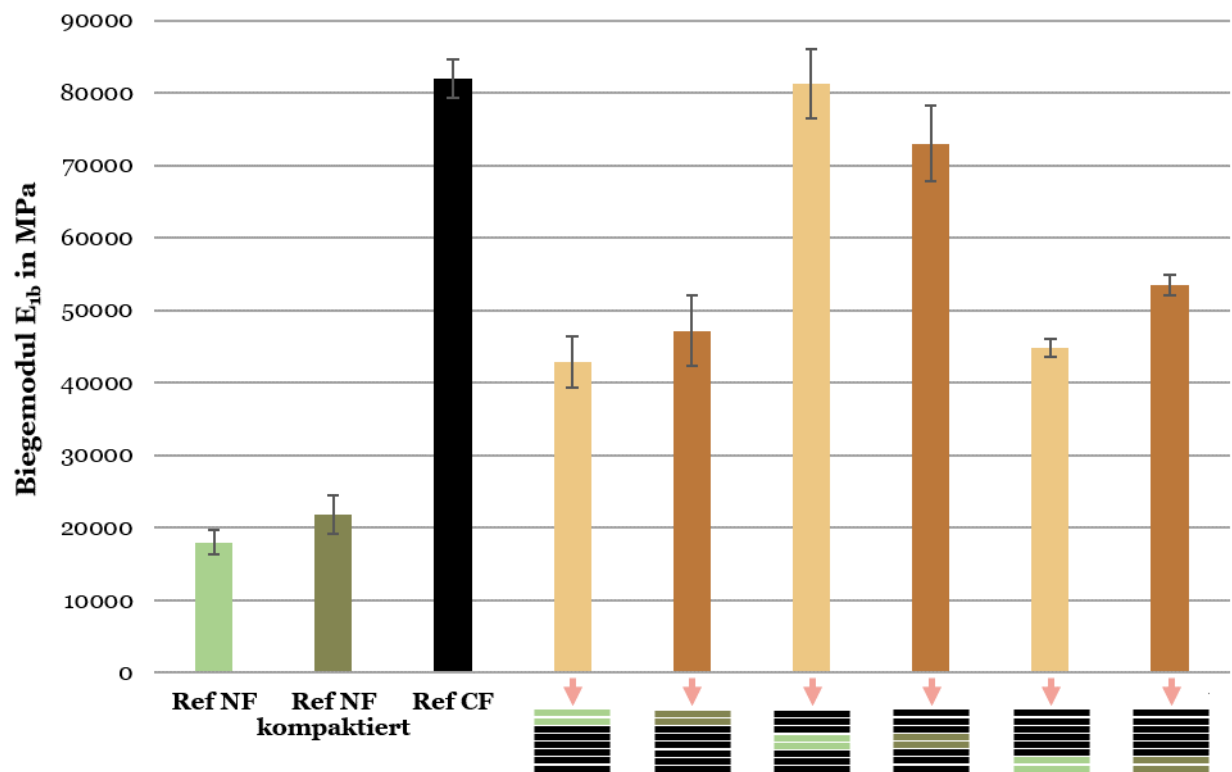


Abbildung 5.24: Biegemodul mit Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung

Die Kompaktierung für das reine Naturfaserlaminat erwirkt für die Biegesteifigkeit eine Erhöhung von etwa 21 % auf 21752 MPa. Liegen die Naturfaserlagen auf der Außenseite des Hybridverbunds so erhöht sich die Steifigkeit leicht im Vergleich zu den entsprechenden Hybridlaminaten mit unkompaktierten Naturfasern. Die Standardabweichung der beiden Hybride mit den Naturfasern auf der Druckseite überschneidet sich, sodass diese Tendenz mit Vorsicht betrachtet werden sollte. Hingegen weist das Laminat mit den Naturfaserlagen in der Mitte eine leicht verringerte Biegesteifigkeit auf. Diese Tendenz ist gegensätzlich zu den anderen Ergebnissen. In der Mitte des Laminats ist die höchste Schubspannung während der Drei-Punkt-Biegung. Die Garnhaarigkeit der Naturfasern sorgt für eine gute Faser-Matrix-Haftung [6]. Allerdings wird durch die Kompaktierung das Gelege geglättet und die Haarigkeit verringert sich deutlich. Eine mögliche Erklärung ist es, dass die Kompaktierung bzw. Glättung der Naturfasern eine Abgleiten begünstigen und entsprechend anfälliger für Schubbelastungen sind. Die Steifigkeit verringert sich aufgrund der ineffizienten Kraftübertragung bedingt durch die verschlechterte Faser-Matrix-Haftung. Die Ergebnisse der DMA zeigen die gleiche Tendenz. Dies sollte jedoch über weitere Untersuchungen wie beispielsweise die Messung der interlaminaren Schubfestigkeit überprüft werden.

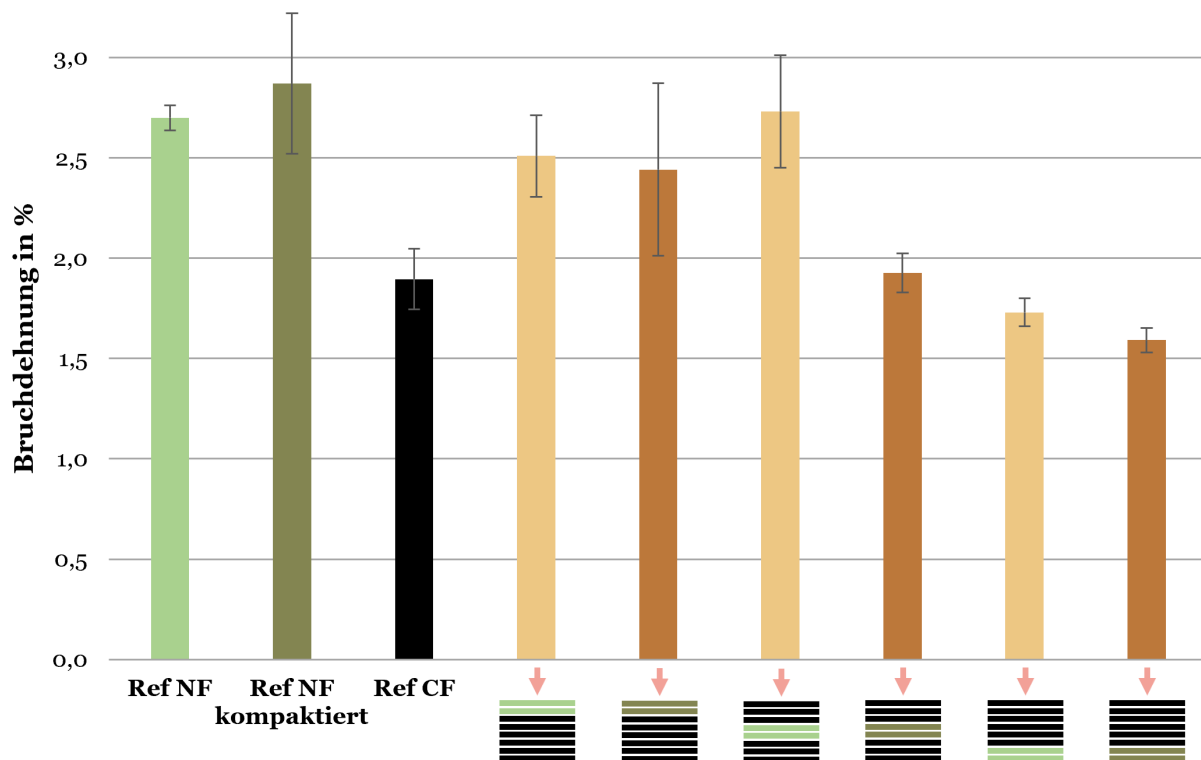


Abbildung 5.25: Bruchdehnung mit Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung

Die Kompaktierung hat im Rahmen der Messunsicherheit auf die Bruchdehnung kaum einen Einfluss. Einzig die Konfiguration mit den Naturfaserlagen in der Mitte weist eine niedrigere Biegebruchdehnung auf. Die Proben mit unkomapktierten Naturfasern weisen vermehrt ein anderes Bruchverhalten mit Delaminationen auf, sodass die Prüfung nicht nach dem ersten Spannungsabfall abgebrochen wird. Die Kraft muss zu 80 % abfallen, um das Abbruchkriterium der Prüfprozedur zu erfüllen. Dies resultiert in einer erhöhten Bruchdehnung. Abbildung 5.26 zeigt jeweils eine Probe zum Vergleich. Oben ist eine Proben mit unkomapktierten und unten eine mit kompaktierten Naturfaserlagen zu sehen.



Abbildung 5.26: Probenvergleich: unten vorkompaktiert, oben unkomapktiert

Die kompaktierten Naturfaserlagen sind allgemein dünner und homogener als die unkomapktierten Lagen. Unkomapktiert weisen die Naturfaser eine erhöhte Welligkeit und Unregelmäßigkeiten auf.

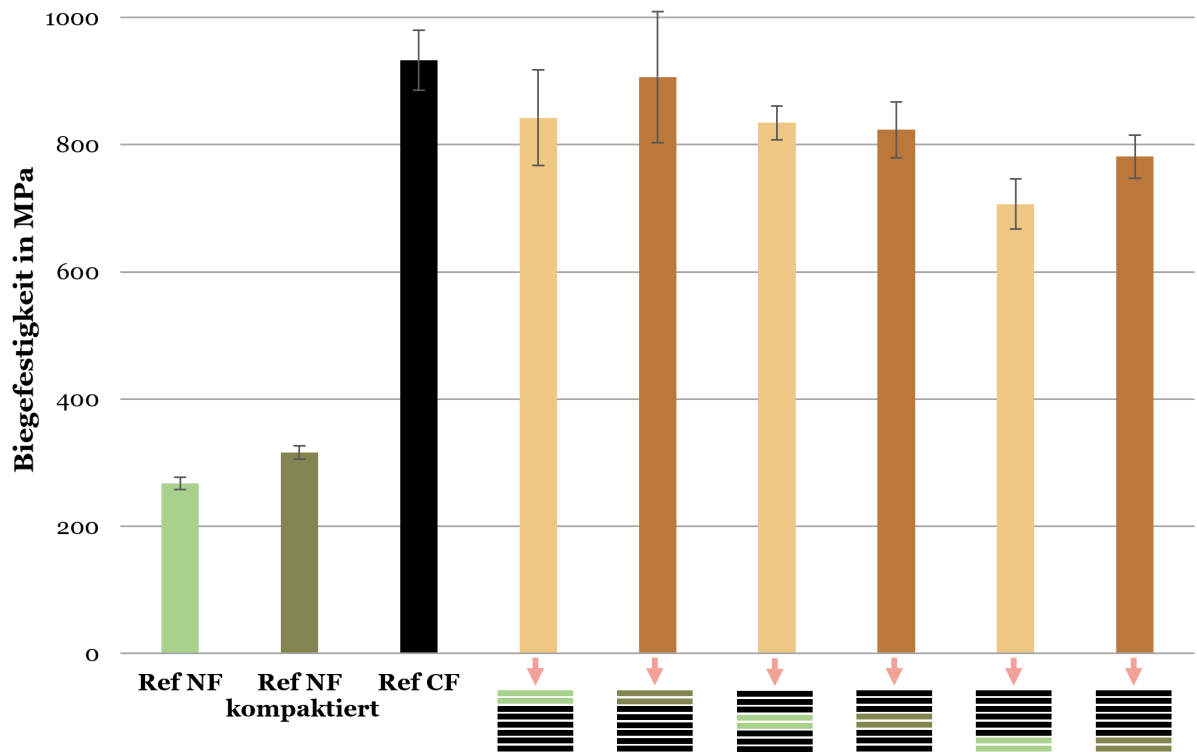
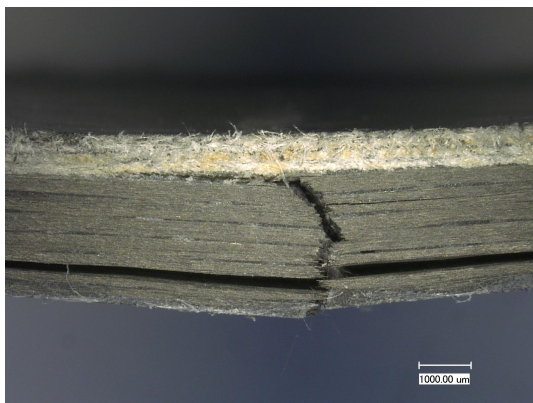


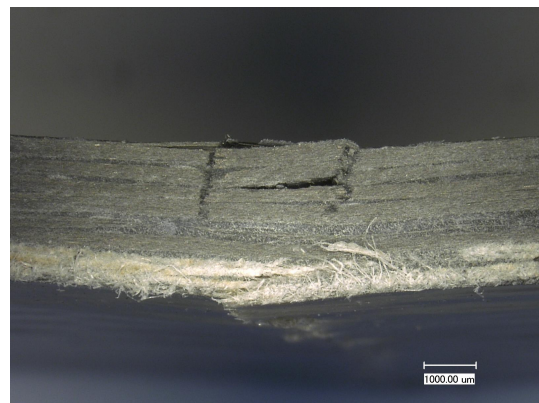
Abbildung 5.27: Biegefestigkeit mit Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung

Durch die Kompaktierung wird die Biegefestigkeit des reinen Naturfaserlaminats etwas erhöht. Dieser Effekt ist bei den Hybridverbunden im Rahmen der Messabweichungen nicht feststellbar. Der Anteil an Naturfasern ist zu gering, als dass eine Kompaktierung einen nennenswerten Einfluss hat.

Abbildung 5.28 zeigt zwei unterschiedliche Brucharten der Konfiguration mit Naturfasern jeweils auf der Druck- bzw. Zugaußenseite.



(a) kompaktierte Naturfaserlage auf der Druckseite



(b) kompaktierte Naturfaserlage auf der Zugseite

Abbildung 5.28: Bruchbilder

Liegen die Naturfasern auf der Druckseite so entsteht bei dem Bruch eine Delamination zwischen den Natur- und Kohlefaserlagen. Darüber hinaus weisen die Kohlefasern ein Zugversagen auf. Befinden sich die Naturfaserlagen hingegen auf der Zugseite, so versagen die Kohlefasern durch ein Schubknicken auf Druck. Die höhere Bruchdehnung der Naturfasern sorgt dafür, dass diese nicht durch eine Zugbelastung versagen.

Die unterschiedlichen Spannungs-Dehnungs-Verläufe sind mit dem Fokus auf dem Kompaktierungseinfluss in Abbildung 5.29 dargestellt. Die einzelnen Verläufe werden so ausgewählt, dass diese repräsentativ für die entsprechende Konfiguration anzusehen sind.

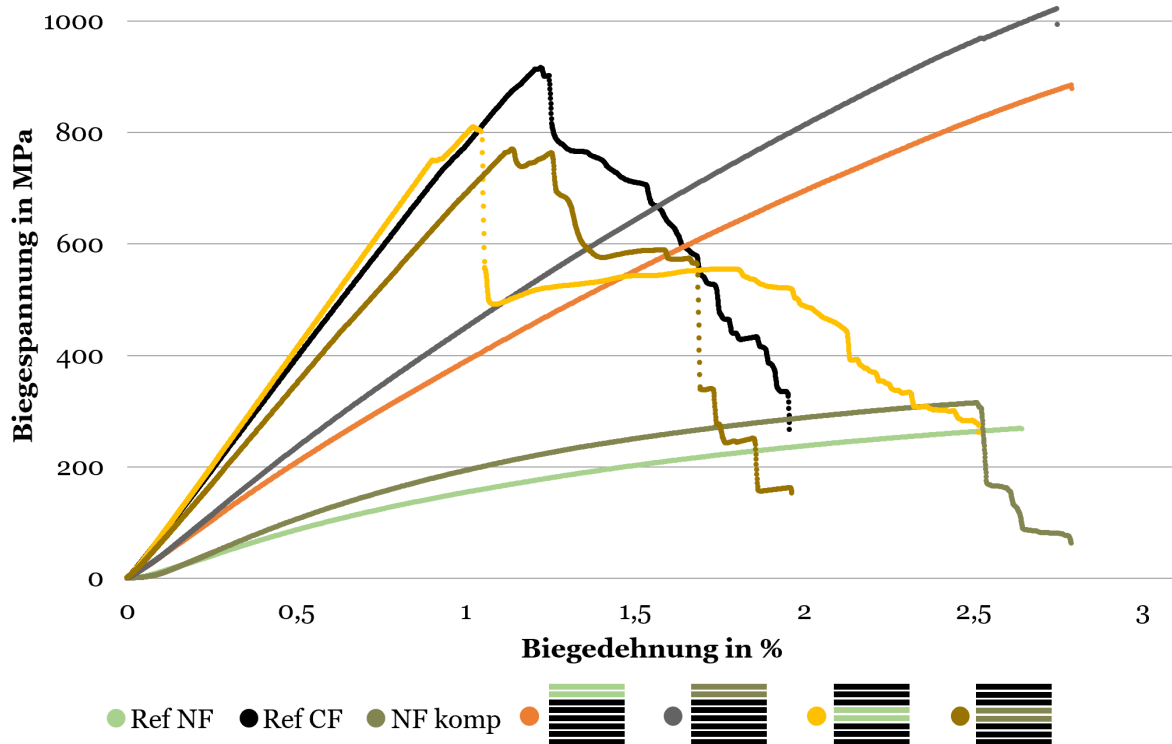


Abbildung 5.29: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeprüfung mit Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung

Die Verläufe zwischen unkompaktierten und kompaktierten Konfigurationen unterscheiden sich in Anbetracht der Messunsicherheiten kaum. Einzig die erhöhte Bruchdehnung des Laminats mit den Naturfasern in der Mitte ist hier zu erkennen. Die Rissausbreitung und das Abbruchkriterium der Prüfprozedur sorgen für die höhere Biegebruchdehnung.



## 5.6 Dynamisch mechanische Analyse

### 5.6.1 Einfluss der Position der Naturfaserlagen

In Abbildung 5.30 ist der Speichermodul in Abhängigkeit der Temperatur der unterschiedlichen Konfigurationen mit dem Fokus auf die Position der Naturfaserlagen dargestellt.

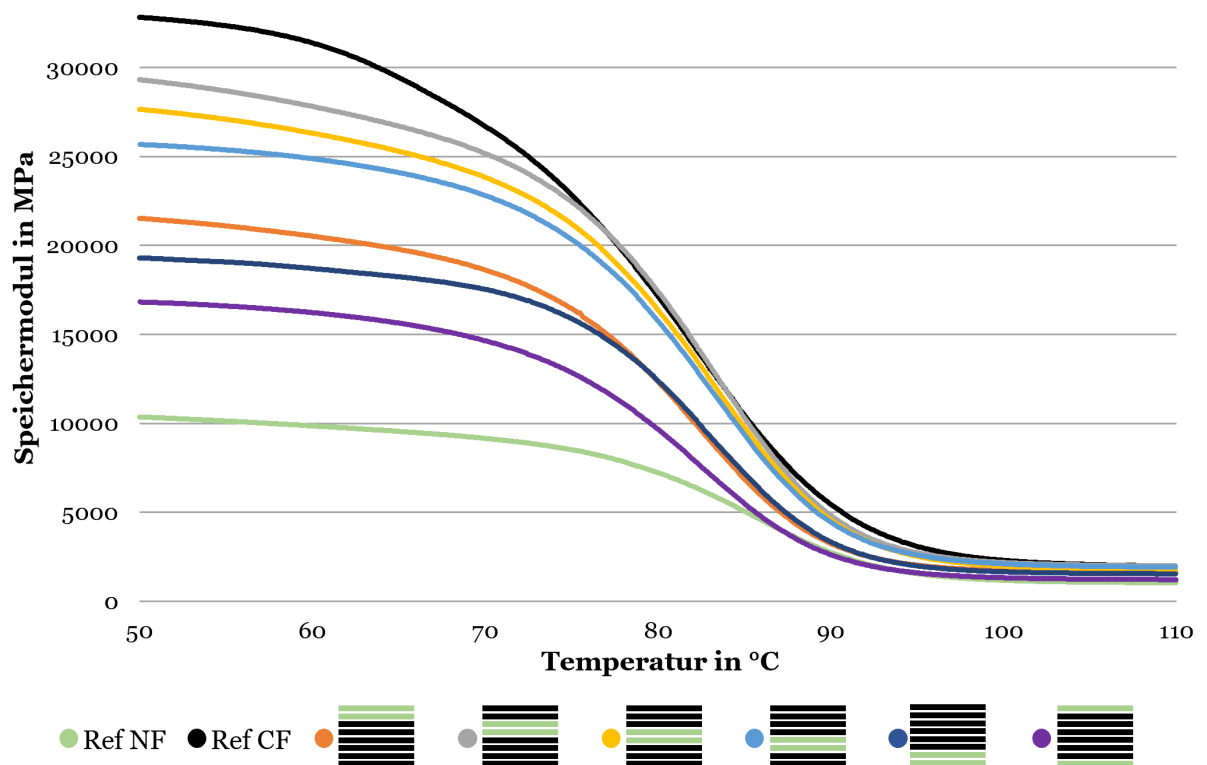


Abbildung 5.30: Speichermodul mit dem Fokus auf die Position der Naturfaserlagen

Mit steigender Temperatur fällt bei allen Proben der Speichermodul ab. Durch die hohe Steifigkeit hat das Laminat mit nur Kohlefaserlagen den höchsten anfänglichen Speichermodul. Die Hybridverbunde weisen einen geringeren Speichermodul auf und das Naturfaserlaminat den Geringsten. Ähnlich wie bei der Drei-Punkt-Biegung verhält es sich hier mit der Position der Naturfaserlagen. Sind diese auf der Außenseite des Verbunds, so ist der anfängliche Speichermodul geringer. Der Vergleich der Drei-Punkt-Biegung mit dem Double-Cantilever in der DMA ist aufgrund der ähnlichen Biegung naheliegend. Die Steifigkeit der beiden äußeren Lagen ist durch die dortige maximale Zug- und Druckspannung entscheidend für den Speichermodul bzw. für die Biegesteifigkeit.

Eine Tendenz auf einen Einfluss der Position der Naturfaserlagen hinsichtlich der Glasübergangstemperatur ist hier nicht zu erkennen. In der Literatur wird gezeigt, dass alternierende Natur- und Kohlefaserlagen einen erhöhenden Effekt auf den Glasübergang im Gegensatz zu anderen Stapelabfolgen haben [21]. Einen Vergleich dazu ist mit diesen

Konfigurationen nicht möglich. Im Rahmen der Messabweichung der DMA ist zwischen den beiden Referenzlaminaten ebenso kein Unterschied in der Glasübergangstemperatur zu erkennen.

Abbildung 5.31 stellt den Verlustmodul in Abhängigkeit der Temperatur dar.

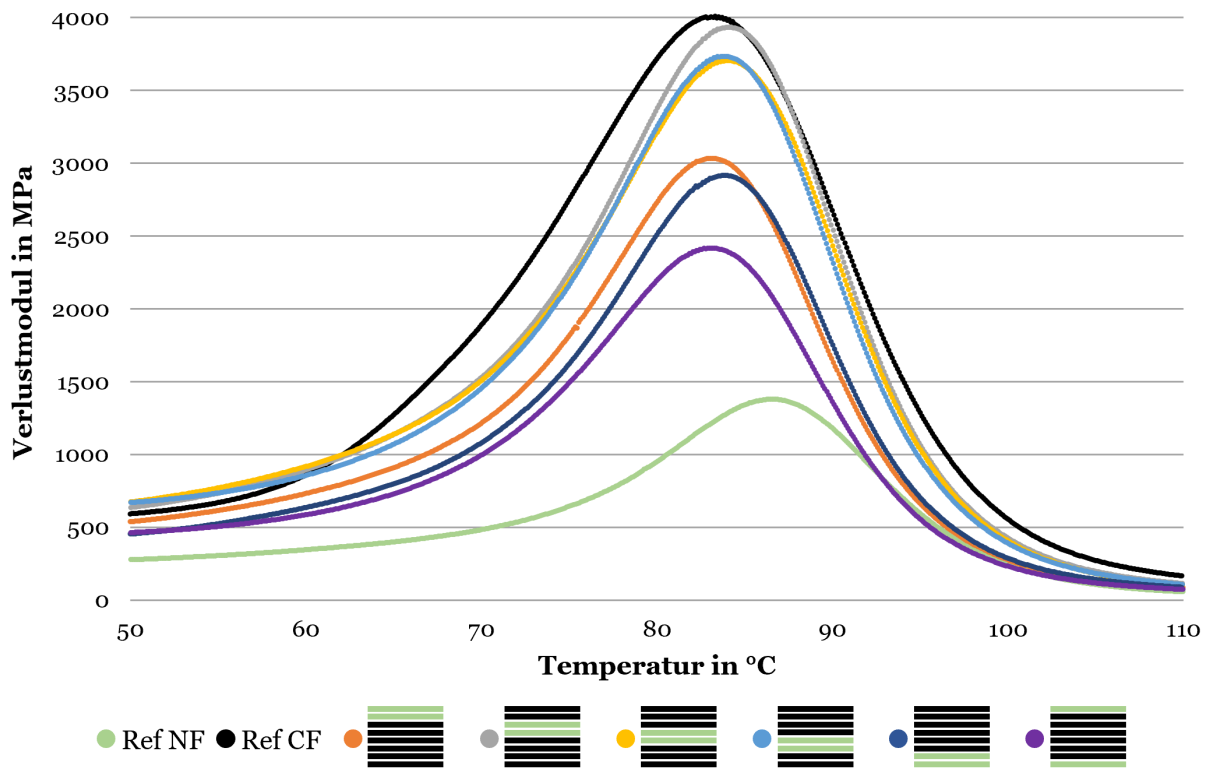


Abbildung 5.31: Verlustmodul mit dem Fokus auf die Position der Naturfaserlagen

Der Verlustmodul steigt, bis eine Temperatur von ca. 85 °C erreicht ist, stark an. An diesem Punkt hat der Verlustmodul bei allen Konfigurationen seinen Maximalwert erreicht und fällt anschließend wieder stark ab.

Das Kohlefaserlaminat hat trotz des höchsten Speichermoduls nicht den höchsten Verlustmodul bei niedrigeren Temperaturen. Dies deutet auf eine geringere Dämpfung im Gegensatz zu den drei Hybridlaminaten mit den Naturfasern in der Mitte hin. Ab einer Temperatur von ca. 62 °C steigt die dissipierte Energie jedoch höher an als die der Hybridverbunde.

Über die Ergebnisse der DMA lässt sich hier kaum eine Aussage über das Dämpfungsverhalten der Verbunde machen, da hier lediglich eine Frequenz von 20 Hz untersucht wird und die unterschiedlichen Laminataufbauten einen Vergleich des Verlustfaktors erschweren. Um die Dämpfung eines Systems näher zu bestimmen, ist beispielsweise eine frei gedämpfte Schwingung über einen Torsionspendel innerhalb der DMA sinnvoll. Das logarithmische Dekrement dieser Schwingung charakterisiert die Dämpfung [22]. Des Weiteren ist es

möglich die akustische Dämpfung mit Hilfe eines Impedanzrohrs bei hohen Frequenzen zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit wurden derartige Messungen durchgeführt, welche allerdings nicht validiert werden konnten und somit für die Auswertung nicht weiter in Betracht gezogen werden.

### 5.6.2 Einfluss der Kompaktierung

In den beiden folgenden Abbildungen 5.32 und 5.33 sind die Verläufe des Speicher- und Verlustmoduls der Lamine mit Fokus auf den Kompaktierungseinfluss dargestellt.

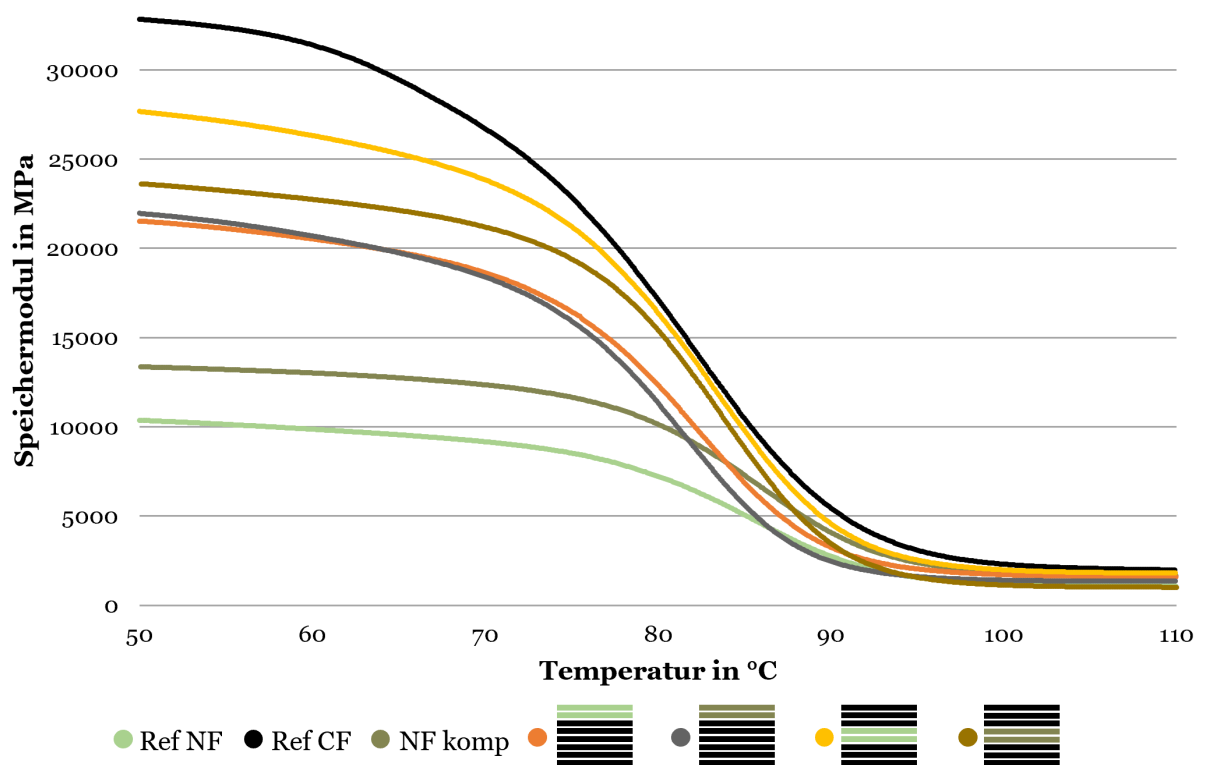


Abbildung 5.32: Speichermodul mit dem Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung

Ähnlich wie bei den Biegeversuchen steigt der Speichermodul des reinen Naturfaserlaminats durch die Kompaktierung an. Zwischen den beiden Laminaten mit den Naturfasern auf der Außenseite ist kein Unterschied festzustellen. Außerdem weist das Hybridlaminat mit den kompaktierten Naturfasern in der Mitte des Laminats einen niedrigeren Speichermodul auf, als der Hybridverbund mit unkompaktierten Fasern. Diese Tendenz wurde bereits in den Biegeprüfungen gezeigt und kann auf die Glättung der Fasergelege und die damit einhergehende Anfälligkeit für Schubbelastungen zurückgeführt werden.

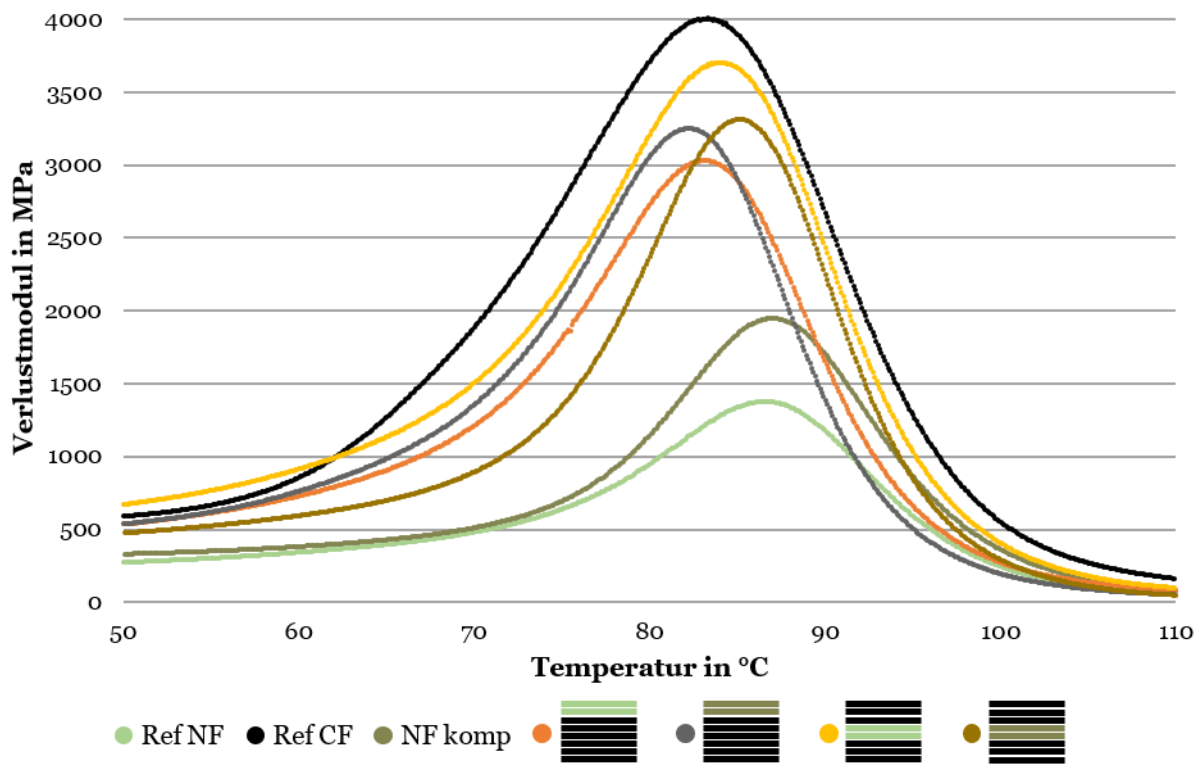


Abbildung 5.33: Verlustmodul mit dem Fokus auf den Einfluss der Kompaktierung

Der Verlustmodul des reinen Naturfaserverbunds mit kompaktierten Fasern ist aufgrund des höheren Faservolumengehalts bei ca. 87 °C höher als der des Verbunds mit unkompaktierten Fasern.

## 5.7 Infusionsdauer

In diesem Abschnitt werden die Infusionszeiten des verwendeten Herstellungsprozesses (VARI) für die Faserverbunde näher betrachtet. In Abbildung 5.34 ist die Fließweglänge der Fließfront in Abhängigkeit der Zeit dargestellt.

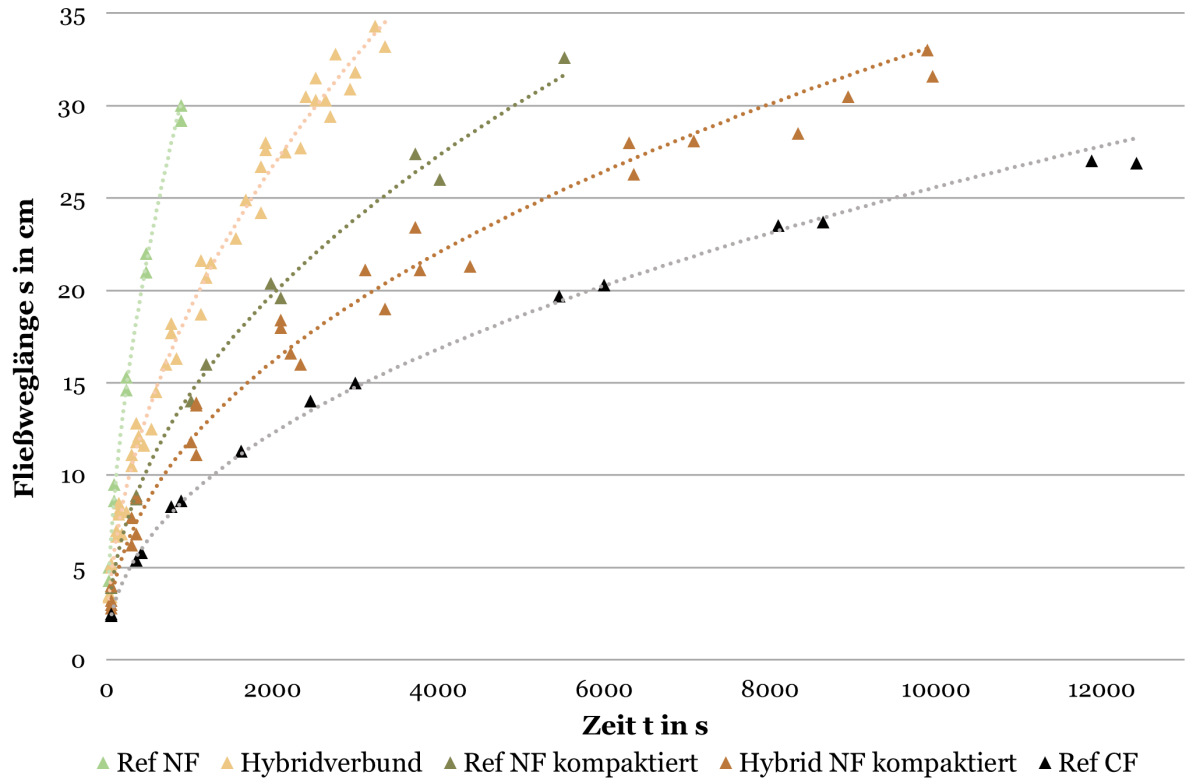


Abbildung 5.34: Fließweglänge in Abhängigkeit der Zeit

Anfangs schreitet die Fließfront bei allen Konfigurationen schnell voran, was sich jedoch mit fortschreitender Infusion weiter verlangsamt. Das Kohlefaserlaminat hat die längste und das Naturfaserlaminat ohne Vorkompaktierung die kürzeste Prozesszeit. Die Hybridverbunde sind schneller infundiert als die reinen Naturfaserlaminare mit Vorkompaktierung.

Durch den negativen Druckgradienten entlang des Fließweges verringert sich die Fließgeschwindigkeit mit zunehmenden Infusionsfortschritt [23].

Die hohe Permeabilität der Naturfasergelege sorgt für eine Verkürzung der Infusionszeiten. Die beiden Naturfaserlagen im Hybridverbund agieren, unabhängig von deren Position, als Fließunterstützung. Dabei entsteht eine keilförmige Fließfront, die eine Infusion der Fasern in Dickenrichtung ermöglichen [6]. Die Kompaktierung hingegen hat einen negativen Einfluss auf die Prozesszeit. Die Fasern liegen durch den aufgebrauchten Druck näher aneinander, wodurch weniger Hohlräume entstehen. Hohlräume, durch die das Harz besser fließen kann, begünstigen eine schnelle Infusion.

In Tabelle 5.1 sind die Formeln von den Trendlinien der einzelnen Konfigurationen aus Abbildung 5.34 (dargestellt als gepunktete Linie) zusammengefasst. Die Trendlinien erlauben eine Vorhersage für die Prozesszeit  $t$  für eine bestimmte Fließlänge  $s$ , die beispielsweise die Länge eines Bauteils darstellen kann. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ( $0 < R \leq 1$ ) gibt die Streuung der Datenpunkte im Vergleich zur Trendlinie an. Je näher dieser Wert an eins liegt, desto besser stimmt die Trendlinie mit den Messpunkten überein.

Tabelle 5.1: Trendlinien der Fließweglängen in Abhängigkeit der Prozesszeit

| Konfiguration  | Trendlinie                    | Bestimmtheitsmaß $R^2$ |
|----------------|-------------------------------|------------------------|
| NF             | $s = 0,7588 \cdot t^{0,5416}$ | 0,997                  |
| Hybridverbund  | $s = 0,6171 \cdot t^{0,4957}$ | 0,991                  |
| NF komp        | $s = 0,5863 \cdot t^{0,4630}$ | 0,995                  |
| Hybrid NF komp | $s = 0,5301 \cdot t^{0,4494}$ | 0,985                  |
| CF             | $s = 0,3786 \cdot t^{0,4575}$ | 0,998                  |

Mit den Trendlinien werden die Prozesszeiten für die Fließweglängen  $s = 15 \text{ cm}$  sowie  $s = 25 \text{ cm}$  berechnet und in Tabelle 5.2 mit dem Kohlefaserlaminat verglichen. Der Wert von  $R^2$  ist für alle Konfigurationen ausreichend gut für diese Abschätzung.

Tabelle 5.2: Prozesszeiten für die Fließweglängen 15 cm und 25 cm im Vergleich zum Kohlefaserlaminat

| Konfiguration  | Zeit für 15 cm<br>[min] | Zeitersparnis<br>[%] | Zeit für 25 cm<br>[min] | Zeitersparnis<br>[%] |
|----------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| NF             | 4,1                     | 92,1                 | 10,6                    | 93,3                 |
| Hybridverbund  | 10,4                    | 79,9                 | 29,2                    | 81,6                 |
| NF komp        | 18,3                    | 64,7                 | 55,2                    | 65,1                 |
| Hybrid NF komp | 28,3                    | 45,3                 | 88,3                    | 44,2                 |
| CF             | 51,8                    | -                    | 158,3                   | -                    |

Die relative Zeitersparnis ist für beide Fließweglängen der jeweiligen Konfiguration gleich. Bei dem Hybridverbund mit zwei Naturfaserlagen wird im Vergleich zum Kohlefaserlaminat ca. 80 % der Prozesszeit eingespart. Durch die Kompaktierung verringert sich der Effekt für die Hybridverbunde auf eine Zeitersparnis von ca. 45 %.

---

## 6 Auswertung und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Hybridverbunde hinsichtlich ihrer prozesstechnischen und strukturellen Eigenschaften bewertet. Dafür erfolgt eine kurze Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt.

### 6.1 Einfluss der Kompaktierung auf die mechanischen Eigenschaften

Bei den Ergebnissen der Zugeigenschaften der Hybridverbunde ist durch die Vorkompaktierung, anders als bei der Referenz, kein Anstieg der mechanischen Eigenschaften zu erkennen. Gleiches gilt ebenso für den Schubmodul und die Biegefestigkeit. Einzig der Biegemodul weist eine leichte Steigerung auf, wenn sich die Naturfasern auf der Außenseite befinden. Liegen die kompaktierten Naturfasern in der Mitte des Laminats, so wird eine leichte Verringerung der Biegesteifigkeit gemessen. Durch die Kompaktierung werden die Naturfasergelege geglättet und die Garnhaarigkeit stark verringert, was potentiell zu einer Verringerung der Faser-Matrix-Haftung führen kann.

Im Allgemeinen ist der Einfluss der Kompaktierung der Naturfasern auf die mechanischen Eigenschaften der Hybridverbunde gering. Dies liegt zum einen an dem geringen Volumenanteil der Naturfasern in dem Hybridlaminat und zum Anderen an dem Steifigkeits- und Festigkeitsunterschied zu den Kohlefasern. Letztere übernehmen hauptsächlich die Funktion der Kraftaufnahme. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass der hohe Aufwand der Vorkompaktierung bei entsprechendem Druck und Temperatur bei der Herstellung von Hybridfaserverbunden nicht sinnvoll ist.

### 6.2 Naturfasern als Fließunterstützung

Bei den Hybridverbunden dienen die Naturfaserlagen als Fließunterstützung und können die Prozesszeiten stark verringern. Dabei ist nicht relevant, wo sich die Naturfaserlagen im Laminat befinden. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass der Fokus auf die Bauteilauslegung und Strukturmechanik des Verbundes gelegt werden kann, ohne Abstriche bei der Prozesszeit hinzunehmen. Die höhere Permeabilität der Naturfaserlagen sorgt für eine keilförmige Fließfront, sodass die Kohlefaserlagen ebenso in Dickenrichtung infundiert werden. Schematisch sind die Fließfronten, wie sie für unterschiedliche Positionen der Naturfaserlagen aussehen können, in Abbildung 6.1 dargestellt.



Abbildung 6.1: Fließfronten der unterschiedlichen Laminataufbauten

Eine Verringerung von etwa 80 % der Infusionszeit kann die Produktionsrate von Bauteilen deutlich erhöhen und damit die Kosten je Bauteil verringern. Dieses Potential soll im Hinblick auf die Position der Naturfaserlagen und den sich ändernden mechanischen Eigenschaften für jedes Bauteil gesondert betrachtet und bewertet werden. Dabei steht die Erhöhung der Produktionsrate der möglichen Verringerung der mechanischen Eigenschaften gegenüber und muss entsprechend des jeweiligen Bauteils abgewogen werden.

Die Vorkompaktierung der Naturfaserlagen für die Hybridfaserverbunde hingegen ist im Hinblick auf die Prozesszeiteinbußen nicht sinnvoll.

## 6.3 Strukturmechanische Bewertung

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Berechnungsmethoden und deren Anwendung auf Hybridfaserverbunde näher betrachtet und mit den Messergebnissen verglichen. Über die Mischungsregel erfolgt zunächst eine simple Abschätzung der Kennwerte. Mit Hilfe des Programms eLamX<sup>2</sup> werden die Berechnungen für die Ingenieurskonstanten, Spannungs- und Dehnungsverteilungen innerhalb des Laminats sowie die Abschätzung der Festigkeit mittels Bruchkriterium durchgeführt.

### 6.3.1 Mischungsregel

Als erste grobe Einordnung der mechanischen Eigenschaften der Lamine wird die Mischungsregel angewandt. Die Kennwerte der einzelnen Bestandteile sind den Datenblättern entnommen [9, 19, 24]. Die beiden Tabellen 6.1 und 6.2 fassen die Werte der Bestandteile sowie die Faservolumenanteile der Lamine zusammen.

Tabelle 6.1: Kennwerte der einzelnen Bestandteile

| Bestandteil | E-Modul $E_1$ | Festigkeit $R_1$ |
|-------------|---------------|------------------|
|             | in GPa        |                  |
| Naturfaser  | 61,00         | 0,58             |
| Kohlefaser  | 255,00        | 3,60             |
| Matrix      | 3,00          | 0,07             |



Tabelle 6.2: Faservolumenanteile der Lamine

| Laminat       | Faservolumenanteil in % |      |
|---------------|-------------------------|------|
|               | NF                      | CF   |
| NF            | 43,4                    | -    |
| NF komp       | 58,0                    | -    |
| CF            | -                       | 45,6 |
| Hybridverbund | 11,0                    | 35,4 |

Die Mischungsregel kann auf die Biegeeigenschaften der Hybridlamine nicht angewandt werden, da diese stark von der Position der Naturfaserlagen abhängig sind. Für eine Betrachtung der Eigenschaften quer zur Faserrichtung ist die Querkontraktionszahl der Matrix erforderlich, um die Querkontraktionsbehinderung besser abzubilden [10,11]. Dieser Wert ist jedoch nicht in dem Datenblatt vorhanden, sodass die Mischungsregel lediglich für die Zugeigenschaften in Faserrichtung verwendet wird. In Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse, welche mit Formel 2.2 ermittelt werden, dargestellt. Repräsentativ für die Hybridverbunde sind die Werte der symmetrischen Konfiguration mit den Naturfasern in der Mitte. Die Festigkeit des reinen Kohlefaserlaminats (mit \* markiert) ist mit besonderer Vorsicht zu betrachten, da diese nur grob abgeschätzt wird. Der Unterschied  $\Delta$  zwischen den berechneten und den gemessenen Werten wird über folgende Formel 6.1 berechnet und in % angegeben.

$$\Delta = \frac{\text{Gemessen} - \text{Berechnet}}{\text{Berechnet}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Tabelle 6.3: Anwendung der Mischungsregel

| Konfiguration | E-Modul $E_1$ |          |          | Zugfestigkeit $R_1$ |          |          |
|---------------|---------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
|               | berechnet     | gemessen | $\Delta$ | berechnet           | gemessen | $\Delta$ |
|               | in GPa        |          | in %     | in MPa              |          | in %     |
| NF            | 28,2          | 24,8     | -12,0    | 291,3               | 225,0    | -22,8    |
| NF komp       | 36,6          | 28,6     | -21,9    | 365,8               | 306,0    | -16,3    |
| CF            | 117,9         | 106,2    | -9,9     | 1679,7              | 1400,0*  | -16,7*   |
| Hybrid        | 100,7         | 84,2     | -16,4    | 1425,3              | 1024,0   | -28,2    |

Für jede Konfiguration wird sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit mit der Mischungsregel zu hoch eingeschätzt. Die berechneten E-Moduln des reinen Kohlefaser- und Naturfaserlaminats weisen den geringsten Unterschied zum gemessenen Wert auf. Bei dem Laminat mit kompaktierten Naturfasern hingegen ist der Unterschied etwa doppelt so hoch. Dies ist auf die potentiell verringerte Faser-Matrix-Haftung durch die Kompaktierung zurückzuführen, welche für die Mischungsregel allerdings als perfekt angenommen wird. Bei dem Hybridverbund ist ebenso eine höhere Abweichung als bei den Referenzlaminaten festzustellen. Aufgrund der zwei unterschiedlichen Fasertypen kann eine verringerte Effizienz der Kraftübertragung innerhalb des Laminats entstehen, welche für die Mischungsregel hingegen als ideal angesehen wird.

Generell ist der Unterschied von der berechneten zur gemessenen Festigkeit höher als bei den Steifigkeiten. Dies zeigt auf, dass diese Mischungsregel weniger für die Vorhersage der Festigkeit geeignet ist, da sie die Komplexität der Bruchmechanik von Faserverbunden nicht abbilden kann. Versagensarten wie Faser- oder Matrixbruch und Delamination sind Beispiele welche die Vorhersage der Festigkeit über die Mischungsregel erschweren. Des Weiteren wird ein lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten angenommen, welches vor allem bei hohen Spannungen oder Naturfaserverbunden nicht der Fall ist. Bei den Hybridverbunden sind außerdem, aufgrund der zwei Faserarten, unterschiedliche Dehnungsverteilungen über die Dicke des Laminats vorhanden. Einzig das Laminat mit rein vorkompaktierten Naturfaserlagen weist eine vergleichsweise geringe Abweichung auf. Dabei ist der hohe Faservolumengehalt des Laminats auffällig. Die Vorhersage der Bruchmechaniken, welche durch die Matrix bedingt sind, erscheint schwieriger zu sein als die Vorhersage der Bruchmechaniken bedingt durch die Fasern. Es wird eine direkte Proportionalität zwischen Faservolumengehalt und Faserfestigkeit angenommen. Bei hohem Faservolumengehalt nähert sich die Festigkeit denen der Fasern an, was in diesem Fall für eine präzisere Vorhersage sorgen kann.

In Tabelle 6.4 sind die Ergebnisse der Mischungsregel (Formel 2.3) unter der Annahme eines Faserbruchs zusammengefasst.

Tabelle 6.4: Mischungsregel der Festigkeit

| Konfiguration | Zugfestigkeit $R_1$ |          |          |
|---------------|---------------------|----------|----------|
|               | berechnet           | gemessen | $\Delta$ |
|               | in MPa              |          | in %     |
| NF            | 267,9               | 225,0    | -16,0    |
| NF komp       | 348,4               | 306,0    | -12,2    |
| CF            | 1664,6              | 1400,0   | -15,9    |
| Hybrid        | 1390,9              | 1024,0   | -26,4    |

Die Unterschiede zwischen den errechneten und gemessenen Werten über diese Mischungsregel sind etwas geringer. Bei den Naturfaserverbunden ist eine größere Verbesserung der Genauigkeit als bei den Hybridverbunden, gegenüber der vorherigen Mischungsregel, festzustellen. Es ist anzunehmen, dass bei deutlich höheren Spannungen in den Hybridverbunden und den unterschiedlichen Fasertypen komplexere Bruchmechaniken auftreten, die auch mit dieser Mischungsregel nicht viel besser abgebildet werden können.

Im Allgemeinen ist die Mischungsregel bei der Anwendung für Hybridfaserverbunde differenziert zu bewerten. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften der zwei Fasertypen entstehen Mechanismen, die in der angewandten Mischungsregel nicht beachtet werden. Dabei spielen die Spannungs- und Dehnungsunterschiede zwischen den Natur- und Kohlefasern eine entscheidende Rolle. Dies wird in den folgenden Abschnitten näher betrachtet.

Bei den Hybridverbunden entstehen höhere Unterschiede zu den tatsächlich gemessenen Werten, als für die reinen Kohle- bzw. Naturfaserverbunde. Außerdem ist die Verwendung der Mischungsregel für die Festigkeit, aufgrund der komplexen Vorgänge der Rissentstehung, weniger geeignet.

### 6.3.2 Ingenieurskonstanten

Die Ingenieurskonstanten der Hybridlamine werden auf Basis der ermittelten Eigenschaften der reinen Natur- bzw. Kohlefaserlamine errechnet. Diese sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst. In der darauffolgenden Tabelle 6.6 sind die Unterschiede zu den gemessenen Werten dargestellt. Diese basieren ebenso auf Formel 6.1 und werden in % angegeben.

Tabelle 6.5: Berechnete Ingenieurskonstanten

| Konfiguration                                                                     | E-Modul $E_1$ | E-Modul $E_2$ | Schubmodul $G_{12}$ | Biegemodul $E_{1b}$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------|
| in MPa                                                                            |               |               |                     |                     |
|  | 82.142        | 6.206         | 5.585               | 52.791              |
|  | 82.142        | 6.206         | 5.585               | 68.712              |
|  | 82.142        | 6.206         | 5.585               | 100.771             |
|  | 82.142        | 6.206         | 5.585               | 104.779             |

Die Werte für die E-Moduln in Zugrichtung sowie der Schubmodul der Hybridverbunde sind gleich. Die Position der Naturfaserlagen hat innerhalb der Laminattheorie keinen Einfluss auf diese Eigenschaften. Einzig der Biegemodul weist Unterschiede zwischen den Konfigurationen auf. Befinden sich die Naturfaserlagen auf der Außenseite des Laminats, so verringert sich die Biegesteifigkeit. Diese Tendenz zeigt sich ebenso in den Messergebnissen.

Tabelle 6.6: Unterschied von den berechneten zu den experimentell ermittelten Ingenieurskonstanten in %

| Konfiguration                                                                       | $\Delta E_1$ | $\Delta E_2$ | $\Delta G_{12}$ | $\Delta E_{1b}$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| in %                                                                                |              |              |                 |                 |
|  | -12,3        | <b>9,6</b>   | <b>17,4</b>     | -33,8           |
|  | -22,5        | -9,8         | <b>4,9</b>      | -36,2           |
|  | <b>4,1</b>   | <b>9,6</b>   | <b>17,0</b>     | -20,4           |
|  | <b>2,5</b>   | <b>9,6</b>   | <b>4,6</b>      | -22,4           |

Über die Laminattheorie werden alle Werte für die Biegesteifigkeit der Lamine überschätzt. Besonders die Hybridverbunde mit den Naturfaserlagen auf der Außenseite weisen einen hohen Unterschied zu den gemessenen Werten auf. Das Überschätzen der Kennwerte ist mit den Annahmen, die für die Laminattheorie getroffen werden, zu begründen. Vor allem die Nicht-Linearität der Naturfaserverbunde sorgt für eine höhere Abweichung. Liegen die Naturfasern auf der Außenseite, wo die Zug- bzw. Druckspannung am höchsten ist, kommt die Nicht-Linearität stärker zum tragen.

Wiederum werden die Schubmoduln im Vergleich zu den gemessenen Werten unterschätzt. Mathematische Betrachtungen tendieren aufgrund der Annahmen, wie beispielsweise perfekte Kraftübertragung oder ideale Faser-Matrix-Haftung, die wahren Kennwerte der Lamine zu überschätzen. Die Schubprüfung weist bei den Hybridverbunden eine erhöhte Standardabweichung auf und gilt im Allgemeinen als schwierig reproduzierbar. Dadurch kann das Unterschätzen des Schubmoduls über Laminattheorie auf die Prüfmethode zurückgeführt werden.

Die Unterschiede der Zugsteifigkeiten sind mit der Kombination der Prüfmethode und der Annahmen für die Berechnung zu begründen. Potentiell wird primär die Steifigkeit der äußeren Lage anstatt des gesamten Laminats gemessen, sodass bei einer äußeren Kohlefaserlage der Kennwert durch die Laminattheorie unterschätzt und bei einer äußeren Naturfaserlage überschätzt wird.

Beispielhaft ist im Folgenden die ABD-Matrix des asymmetrischen Laminats mit den Naturfaserlagen auf der Außenseite dargestellt. Die B-Matrix ist dabei fett markiert. Bei symmetrischen Laminaten sind alle Werte dieser Matrix Null.

$$\begin{bmatrix} 262855,6 & 7408,0 & 0 & -88725,7 & -965,8 & 0 \\ 7408,0 & 19859,4 & 0 & -965,8 & -3752,4 & 0 \\ 0 & 0 & 17872,6 & 0 & 0 & -3675,7 \\ -88725,7 & -965,8 & 0 & 187630,1 & 5922,3 & 0 \\ -965,8 & -3752,4 & 0 & 5922,3 & 15395,7 & 0 \\ 0 & 0 & -3675,7 & 0 & 0 & 13732,0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Das negative Vorzeichen der Werte entsteht durch die Position der Naturfaserlagen. Befinden sich diese auf der anderen äußeren Seite des Laminats, so kehrt sich das Vorzeichen um. Der Betrag bleibt dabei gleich.

In Abbildung 6.2 sind die Verformungen bedingt durch die Kopplungsmatrix  $B$  dargestellt.

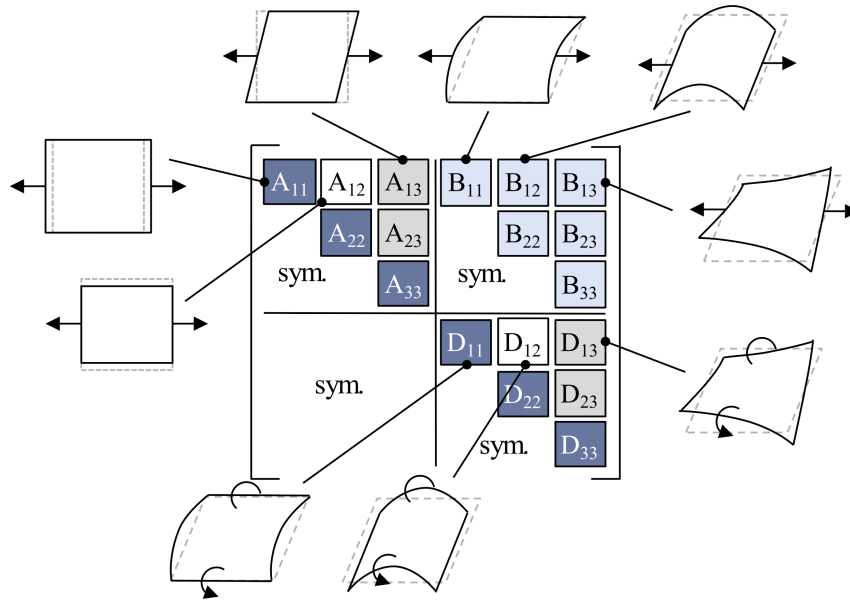


Abbildung 6.2: Resultierende Verformungen durch die B-Matrix [25]

Der Wert  $B_{11}$  verknüpft beispielsweise die Spannung  $\sigma_{11}$  (durch  $A_{11}$  ausgedrückt) mit den Biegekrümmungen  $\kappa_{11}$  (durch  $D_{11}$  ausgedrückt), wodurch eine Biegeverformung hervorgerufen wird. Durch die Aushärtetemperatur des Harzes ( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tritt bei Raumtemperatur ein Unterschied von etwa  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf, was dafür sorgen kann, dass interne Spannungen in dem Laminat entstehen. Mit der Asymmetrie des Verbunds werden Spannungen mit einer Biegung gekoppelt, sodass sich das Laminat bei Raumtemperatur verformt. Dieser Effekt ist in Abbildung 6.3 zu sehen.

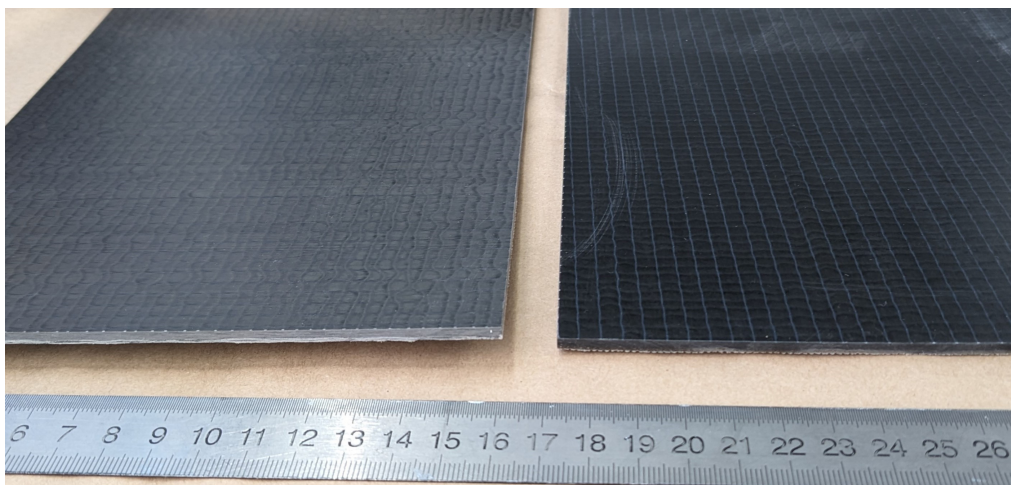


Abbildung 6.3: Links: Krümmung des asymmetrischen Laminats, rechts: als Vergleich die symmetrische Referenz

Auf der linken Seite ist das asymmetrische Laminat mit den Naturfasern auf der Unterseite und rechts die Kohlefaserreferenz zu sehen. Auf eine Plattenlänge von etwa 25 cm ist eine Verformung von ca. 1 cm zu beobachten. Diese Asymmetrie kann die Bestimmung und Berechnung der Zugspannungen zusätzlich beeinflussen, sodass weitere Abweichungen entstehen.

### 6.3.3 Spannungs- und Dehnungsverteilung innerhalb eines Laminats

Die Darstellung der Spannungs- und Dehnungsverteilungen innerhalb der Verbunde erfolgt qualitativ in Abhängigkeit der Dicke des Laminats. Betrachtet wird dabei eine Zugbelastung in Faserrichtung. Abbildung 6.4 zeigt den Dehnungs- und Spannungsverteilung für den Hybridverbund mit den Naturfaserlagen auf der Außenseite. Die x-Achse stellt dabei die Mittelachse bzw. Mittelebene des Laminats dar. Die grauen Linien zeigen die Grenzflächen zwischen zwei Lagen an. Die unkompaktierten Naturfaserlagen sind im Mittel 0,11 mm je Lage dicker als die Kohlefaserlagen.

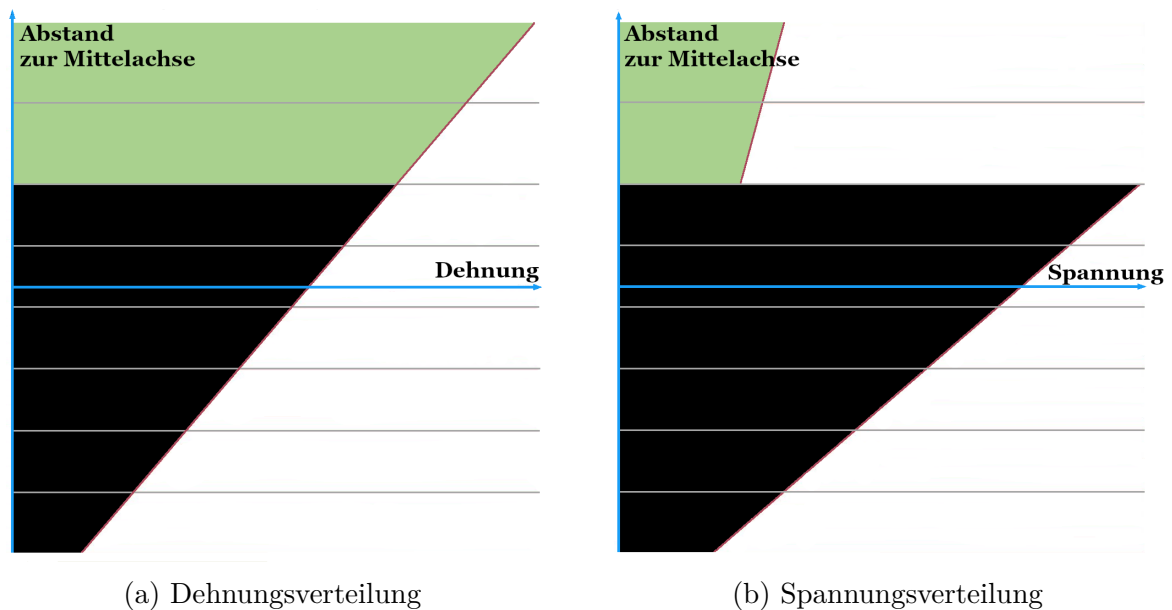


Abbildung 6.4: Dehnungs- und Spannungsverteilung innerhalb des asymmetrischen Hybridverbunds mit den Naturfaserlagen auf der Außenseite

Durch den asymmetrischen Aufbau und der unterschiedlichen Schichtdicke zwischen den Natur- und Kohlefaserlagen befindet sich die Mittelachse nicht auf einer Grenzfläche zweier Lagen. Sowohl die Dehnungsverteilung, als auch die Spannungsverteilung, ist nicht homogen sondern verläuft als Gradient linear über die Dicke des Laminats. Die Dehnung der äußersten Naturfaserlage ist in diesem Fall etwa um das achtfache höher als die der äußersten Kohlefaserlage. Während bei den Naturfasern die höchste Dehnung entsteht, ist

dort die geringste Spannung. Der Spannungssprung zwischen Natur- und Kohlefaser ist auf den Steifigkeitsunterschied zurückzuführen.

Zur Ermittlung der Steifigkeiten der Verbunde mittels Zugversuch wird ein Farbmuster auf die äußerste Schicht, in diesem Fall die Naturfaserlage, aufgetragen. Das Kamerasystem erfasst über Verschiebungen des Musters die Dehnung. Durch die Spannungs- und Dehnungsverteilung wird deutlich, dass die von außen aufgenommene Dehnung nicht der wahren Dehnung für die jeweilige Spannung des gesamten Laminats entspricht. Eine höhere Dehnung der Außenlage sorgt bei gleicher oder niedriger Spannung für eine geringe Steifigkeit des Laminats.

In Abbildung 6.5 sind die Dehnungs- und Spannungsverteilungen innerhalb des asymmetrischen Laminats mit den Kohlefaserlagen auf der Außenseite zu sehen.

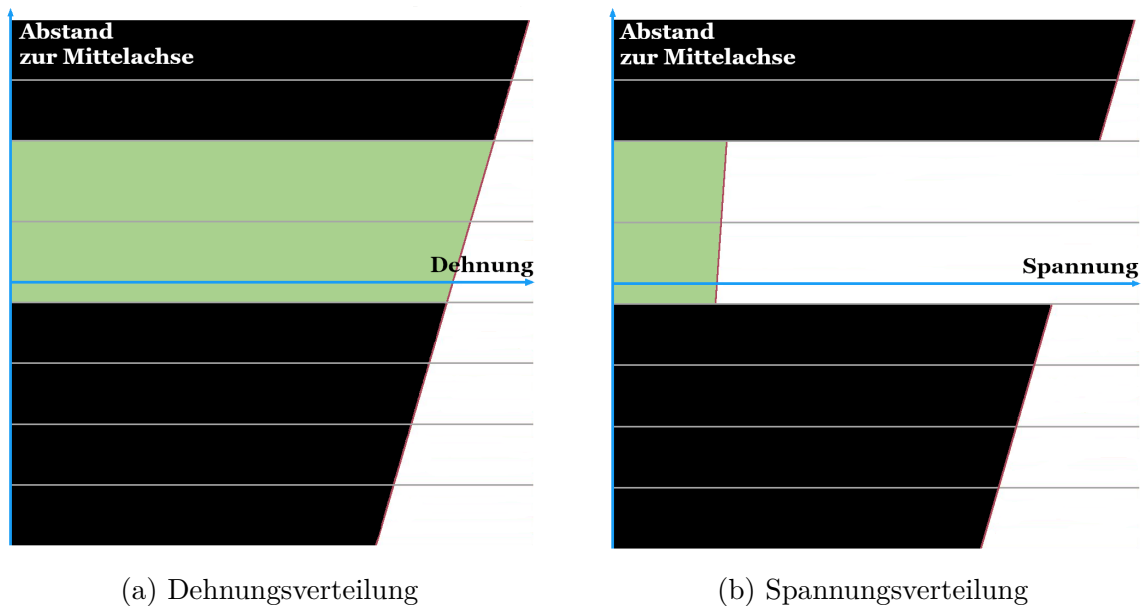


Abbildung 6.5: Dehnungs- und Spannungsverteilung innerhalb des asymmetrischen Hybridverbunds mit den Kohlefaserlagen auf der Außenseite

Bei dieser Konfiguration ist die Asymmetrie nicht so stark ausgeprägt wie bei der Vorherigen. Dadurch ist der Gradient geringer und der Unterschied der Dehnung zwischen den Außenseiten niedriger. Die Spannung der Kohlefaserlagen ist etwa vierfach so hoch wie die der Naturfaserlagen.



Die Spannungsverteilungen für beide symmetrische Hybridlamine sind in Abbildung 6.6 dargestellt.

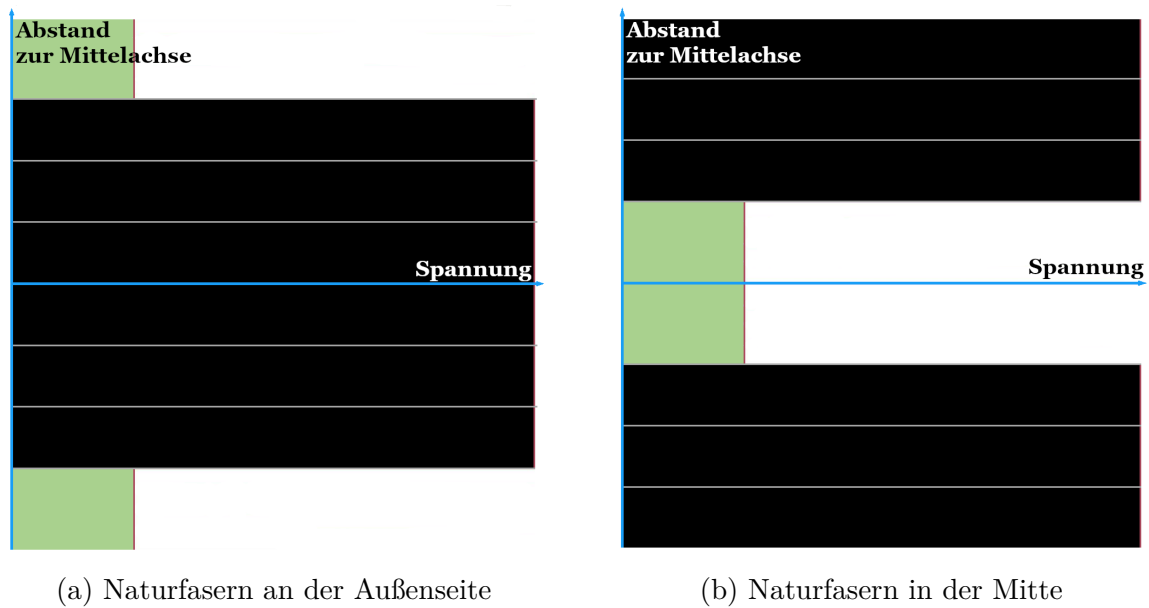


Abbildung 6.6: Spannungsverteilungen innerhalb der symmetrischen Hybridverbunde

Die Dehnungsverteilungen der symmetrischen Hybridverbunde sind konstant homogen über die Dicke des Laminats verteilt. Bei den reinen Natur- bzw. Kohlefaserlaminaten ist dies ebenso für die Spannungsverteilung der Fall.

Über die Spannungsverteilungen wird deutlich, dass die Kohlefaserlagen aufgrund des Steifigkeitsunterschieds eine deutlich höhere Last aufnehmen als die Naturfaserlagen.

#### 6.3.4 Versagensanalyse mittels Bruchkriterium

In Tabelle 6.7 ist die Versagensanalyse mittels Bruchkriterium für die Hybridverbunde zusammengefasst. Über das Kriterium wird die Spannung einer Einzellage mit ihrer Festigkeit bei einer reinen Zugbelastung verglichen. Die Belastung  $n_x$  für die Laminattheorie wird in  $\frac{N}{mm}$ , also Kraft ( $F$  in  $N$ ) über die Breite ( $b$  in  $mm$ ) des Laminats, angegeben. Es wird angenommen, dass das Versagen einer Einzellage in ein Versagen des gesamten Laminats resultiert. Dadurch ergibt sich mit der Breite der Probe, die auf das Laminat wirkende Kraft und dem Querschnitt (mit der Dicke  $d$  der Probe) die Festigkeit  $R_1$  des Laminats:

$$R_1 = \frac{n_x \cdot b}{d \cdot b} \quad (6.3)$$

Tabelle 6.7: Festigkeit nach dem Bruchkriterium maximaler Spannung

| Konfiguration                                                                     | Festigkeit $R_1$ |                | Versagensart            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------|
|                                                                                   | gemessen         | Bruchkriterium |                         |
|                                                                                   | in MPa           |                |                         |
|  | 1145,3           | 744,5          | Naturfaserbruch, beide  |
|  | 1175,7           | 362,8          | Naturfaserbruch, äußere |
|  | 1091,1           | 712,0          | Naturfaserbruch, äußere |
|  | 1024,3           | 763,8          | Naturfaserbruch, beide  |

Bei allen Hybridverbunden hat die Naturfaserlage, trotz der deutlich höheren Spannungsaufnahme der Kohlefaserlagen, versagt. Im Falle der asymmetrischen Konfigurationen ist es die äußere Lage, welche als Erstes bricht. Dies ist auf die dortigen hohen Spannungen zurückzuführen. Im Allgemeinen unterschätzt das Bruchkriterium die gemessene Festigkeit deutlich. Vor allem die asymmetrische Konfiguration mit den Naturfasern auf der Außenseite weist einen deutlichen Unterschied auf. Über das Bruchkriterium wird die Bruchdehnung der beiden unterschiedlichen Lagentypen nicht beachtet. Diese ist bei den Naturfaserlagen höher als bei den Kohlefaserlagen, sodass die Annahme des Naturfaserbruchs falsch sein kann. Diese Annahme kann dazu führen, dass die Abweichungen zu den gemessenen Werten stark ansteigen.

---

## 7 Fehlerdiskussion

In diesem Abschnitt werden die Abweichungen beziehungsweise Fehler der Messmethoden und deren Relevanz auf die Ergebnisse diskutiert. Dabei wird auf die Probenherstellung sowie jede angewandte Methodik in dem jeweiligen Abschnitt eingegangen.

### 7.1 Probenpräparation

Bei der Herstellung der Proben können verschiedene Mechanismen auftreten, die die Messergebnisse beeinflussen.

Zum einen wurde das Relaxations- und Rückstellverhalten des verwendeten Flachsfasergeleges nicht näher untersucht. So ist beispielsweise ein anderes Kompaktierungsverhalten für eine unterschiedliche Lagenanzahl zwischen der Referenz (acht Lagen) und einem Hybridverbund (zwei Lagen) denkbar. Die Relaxation und das Rückstellen der Naturfasern können sich bei acht Lagen zur Herstellung der Referenz deutlicher bemerkbar machen als bei zwei Lagen, die zur Herstellung der Hybridverbunde genutzt werden.

Bei dem angelegten Vakuum während des Infusionsprozesses wird ein Druckgradient über den Fließfortschritt aufgebaut. Daraus resultieren unterschiedliche Dicken in Infusionsrichtung über das Laminat hinweg. Bei dem Anguss weist die Verbundplatte die höchste Dicke und damit den niedrigsten Faservolumengehalt auf. Über eine Infusionslänge von etwa 30 cm ist eine Dickenänderung von ca. 0,5 mm festzustellen. Dieser Dickenunterschied beeinflusst über den Faservolumengehalt die Steifigkeit und die Festigkeit des Materials. Der Einfluss möglicher Lufteinschlüsse durch den Herstellungsprozess hat sich hier als gering herausgestellt. Jedoch sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass Luftblasen die Entstehung von Mikrorissen begünstigen und so Schwachstellen in dem Material hervorrufen können.

Bei dem Ablegen der Fasergelege für den VARI-Prozess sowie durch das anschließende Zusägen der Proben können leichte Unterschiede in der Faserorientierung entstehen. Diese verursachen eine andere Kraftübertragung, sodass beispielsweise Schubspannungen bei einem Zugversuch eintreten und so das Messergebnis verfälschen.

### 7.2 Druckversuch

Die axiale Druckprüfung wurde für eine qualitative Bewertung der Verbunde verwendet. Im Allgemeinen gilt es als schwierig reproduzierbare Ergebnisse für die Druckfestigkeiten zu ermitteln. Dabei ist die Druckfestigkeit oft weniger ein Materialkennwert mit echtem Druckversagen, sondern vielmehr ein Stabilitätsversagen und ein Knicken des Verbunds bzw. der Fasern. Es entstehen komplexe Bruchvorgänge, welche bereits durch die Einspannung der Proben stark beeinflusst werden kann. Darüber hinaus wurden in dieser Prüfreihe

lediglich drei Proben je Konfiguration getestet, was vor allem bei schwer reproduzierbaren Kennwerten kritisch anzusehen ist.

### 7.3 Zugversuch

Für den Zugversuch werden einige Änderungen im Gegensatz zur verwendeten Norm durchgeführt. Für Festigkeitsprüfung sind durch die Konfigurationen bedingte Probendicke von ca. 3 mm hohe Kräfte erforderlich. Um unterhalb der maximalen Prüfkraft von 100 kN der Prüfmaschine zu bleiben, wird der Querschnitt über die Breite der Probe von 25 mm auf 20 mm verringert. Dadurch repräsentiert eine Probe weniger Material und potentielle Schwachstellen, was in einer höheren Standardabweichung resultieren kann.

Zunächst werden die Proben auf ihre Steifigkeit mit einer 10 kN-Kraftmessdose getestet. Anschließend findet die Festigkeitsprüfung der vorbelasteten Proben an einer weiteren Prüfmaschine mit einer 100 kN-Kraftmessdose statt. Die Vorbelastung erfolgt lediglich im elastischen Bereich bis zu einer Dehnung von 0,25 %, sodass dies keinen großen Einfluss auf die Festigkeit hat.

Die Messergebnisse weisen Indizien auf, dass lediglich die Dehnung der äußersten Schicht mit dem Kamerasystem gemessen wird. Potentiell entspricht diese Dehnung nicht der des gesamten Laminats und zeigt damit die Grenzen des Messprinzips auf.

Zum Anbringen der Aufleimer auf den Proben wird der Kleber *Araldite AW4858/HW4858* dem *Araldite 2011* aufgrund seiner höheren Festigkeit vorgezogen. Jedoch ist die Viskosität des *AW4858* ebenso höher, was die Verarbeitbarkeit für die empfohlene Schichtdicke von 0,05 mm erschwert. Die erreichte Klebschichtdicke hingegen beträgt etwa 0,4 mm. Diese Abweichung zur Empfehlung führt bei hohen Zugkräften, zur Prüfung der Festigkeit, zu einem Versagen der Klebschicht und Abreißen der Aufleimer [10]. In Abbildung 7.1 ist die Klebfestigkeit in Abhängigkeit der Klebschichtdicke dargestellt.

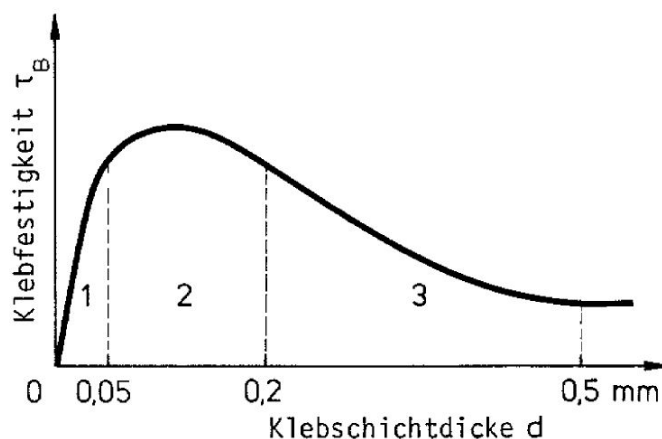


Abbildung 7.1: Klebfestigkeit in Abhängigkeit der Klebschichtdicke [10]

Die Abhängigkeit zeigt deutlich, dass die erreichte Schichtdicke von etwa  $0,4\text{ mm}$  zu hoch für eine optimale Festigkeit ist.

Zur Verwendung des Klebers *Araldite 2011* werden die Proben um die Länge der Aufleimer gekürzt und anschließend neu aufgebracht. Dadurch entsteht eine geringere Messlänge von  $45\text{ mm}$  als in der Norm vorgesehen. Dies kann ebenso, wie die Verringerung der Breite der Proben, zu höheren Standardabweichungen führen.

Bei der Verwendung der Universalprüfmaschine von *Zwick* am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PuK) kommt es bei Kräften  $> 35\text{ kN}$  zum Versagen der Aufleimer. Ein Bruchbild ist in Abbildung 7.2 zu sehen.

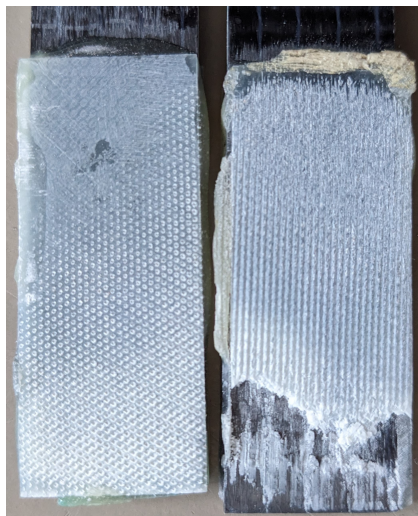
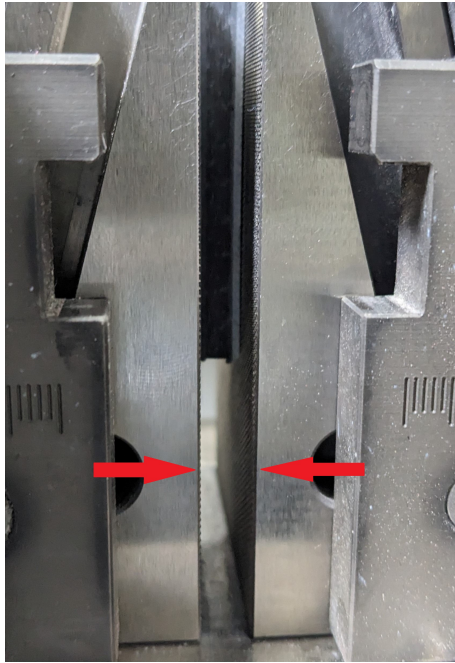


Abbildung 7.2: Bruchverhalten der Aufleimer in der Prüfmaschine am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Der Aufleimer, bestehend aus glasfaserverstärktem Kunststoff, bricht am unteren bzw. oberen Ende einer Probe. Auffällig sind die durch die Zacken der Klemmbaken verursachten Spuren, welche zur Mitte der Probe hin weniger werden. Dies deutet auf Spannungsspitzen an den Enden der Proben hin.

Abbildung 7.3 zeigt auf der linken Seite die Klemmbaken der Prüfmaschine von *Zwick* des PuKs und auf der rechten seiten die Klemmbaken der Prüfmaschine von *Instron* am Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik (IWW). Auf den Bildern ist jeweils eine Probe zur Anschauung eingespannt.



(a) Klemmbacke der Prüfmaschine von *Zwick* am PuK



(b) Klemmbacke der Prüfmaschine von *Instron* am IWW

Abbildung 7.3: Vergleich der beiden Klemmbacken

Die Fläche der Klemmbacken der Prüfmaschine am PuK ist deutlich größer als die der verwendeten Aufleimer. Je höher die Zugkraft, desto stärker werden die Klemmbacken zusammengedrückt, um die Klemmkraft der Zugkraft anzupassen. Dadurch, dass die Fläche der Aufleimer nicht der der Klemmbacken entspricht, entsteht eine inhomogene Spannungsverteilung mit Hebelwirkung an der Kante der Probe. Die Klemmbacken für die Prüfmaschine von *Instron* sind deutlich kleiner und ermöglichen eine homogene Klemmspannungsverteilung auf den Aufleimern. Die Umstände erfordern einige Versuche mit den reinen Kohlefaserverbundproben, sodass dessen Festigkeit nicht ausreichend bestimmt wird.

## 7.4 Garnzugversuch

Bei der Garnzugprüfung wird das Garn zunächst um eine Aluminiumstange gewickelt und anschließend mit zwei Gummimatten in den Klemmbacken befestigt. Durch die Reibung des Garns mit der Stange wird Spannung abgebaut, die dafür sorgt, dass die Fasern nicht aus den Klemmen rutschen. Für die Prüfung wird über die Prüfprozedur eine Vorkraft von  $2\text{ N}$  angefahren. Durch die Reibung ist es möglich, dass die Vorkraft erreicht wird bevor der maximale Reibwiderstand über die Stange erreicht ist. Dies kann aufgrund der höheren Prüfgeschwindigkeiten zu Ungenauigkeiten der Kraftaufnahme führen.

Mit der Kompaktierung ist es lediglich eine maximale freie Messlänge von etwa  $70\text{ mm}$

möglich. Dies ist bedingt durch die begrenzte Kompaktierungsfläche in der Presse. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden alle Proben mit gleicher Messlänge getestet. Längere Proben haben den Vorteil mehr potentielle Schwachstellen des Garns zu repräsentieren, was in präziseren Messungen resultieren kann.

## 7.5 Schubversuch

Allgemein sind reine Schubbeanspruchungen schwer zu erreichen, sodass unterschiedliche Methoden andere Ergebnisse liefern können [6]. In der Norm ist nahezu eine quadratische Probenform zur Messung des Schubmoduls vorgesehen. Hier werden jedoch rechteckige Proben verwendet ( $160\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ), sodass dadurch vermehrt Biegespannungen auftreten können. Diese beeinflussen das Ergebnis der Schubsteifigkeit.

Bei matrixdominanten Kennwerten, wie bei dem Schubmodul, kann es öfter zu nicht-linearen Verläufen kommen, die eine Ermittlung der Steifigkeit erschweren [6]. Jedoch ist das Bestimmtheitsmaß mit  $R > 0,994$  der ermittelten Kurven für den Schubmodul ausreichend gut.

Auch für diese Prüfung werden lediglich drei Proben je Konfiguration getestet. Eine höhere Probenanzahl für genauere Messungen zu verwenden, ist aufgrund der großen Probenfläche und Materialmangels nicht möglich.

## 7.6 Klassische Laminattheorie

Die getroffene Annahmen für die Berechnungen über die klassische Laminattheorie werden in Abschnitt 2 näher erläutert und zusammengefasst. Der größte Faktor für die entstehenden Abweichungen ist der Aspekt mit dem ideal, linear-elastischem Materialverhalten. Vor allem die Naturfasern können dieses Verhalten nicht aufweisen, was die Vorhersage der Materialkennwerte deutlich erschwert. Dieser Trend wurde über die Vorhersage des Biegemoduls gezeigt. Wenn die Naturfaserlagen an der Position der höchsten Zug- bzw. Druckspannung liegen, nehmen diese mehr Spannung auf und das nicht-lineare Materialverhalten kommt stärker zum Tragen. Außerdem ist die Annahme der perfekten Faser-Matrix-Haftung von Bedeutung. Durch die Kompaktierung scheint diese sich zu verringern, was in höheren Abweichungen resultieren kann. Die Auswirkungen weiterer Annahmen für die klassische Laminattheorie sind als geringer einzuschätzen.

## 7.7 Allgemein

Im Allgemeinen sind die Abweichungen und Fehler der verwendeten Messgeräte wie beispielsweise die Kraftmessdosen, Messschieber, Kamerasystem oder die Fehlertoleranz der Temperatur in einer DMA zu nennen. Jedoch ist dabei vor allem die Durchführung

der angewandten Prüf- und Probenvorbereitungsmethoden hinsichtlich der entstehenden Messabweichungen oft der ausschlaggebende Faktor.

Darüber hinaus bringen die verwendeten Materialien von Natur aus eine gewisse Abweichung mit sich. Vor allem Materialien, die auf natürlichen Rohstoffen basieren, weisen oft eine erhöhte Standardabweichung auf.

Die mathematische Bestimmung der Trendlinie zur Ermittlung der Steifigkeiten mit der Methode der kleinsten Quadrate bringt eine Abweichung mit sich, die vernachlässigbar klein ist.



---

## 8 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel, die Naturfasern als Fließunterstützung zu verwenden, konnte im Vergleich zum Kohlefaserlaminat mit einer Zeitersparnis von 80 % erreicht werden. Die Kompaktierung ist für Hybridfaserverbunde nicht sinnvoll, da dieser Prozessschritt keine nennenswerten Vorteile für die Eigenschaften hervorbringt und dabei die Zeitersparnis deutlich verringert.

Die mechanischen Eigenschaften weisen je nach Belastungsfall unterschiedliche Unterschiede zum reinen Kohlefaserlaminat auf. Für eine Biegebelastung ist es sinnvoll die Naturfaserlagen in der Mitte zu platzieren, sodass die Kohlefasern die höheren Zug- und Druckspannungen aufnehmen können. Bei einer Zugbelastung ist eine Verringerung der Steifigkeit und der Festigkeit unabhängig der Position der Naturfaserlage festzustellen.

Die Berechnung und Vorhersage von Kennwerten für die Hybridverbunde über die klassische Laminattheorie ist eingeschränkt möglich. Vor allem die Biegesteifigkeiten sowie die Zugfestigkeiten weisen große Unterschiede zu den Messergebnissen auf. Das nicht-lineare Materialverhalten der Naturfasern erschwert das Berechnen dessen Kennwerte. Im Allgemeinen tendieren mathematische Betrachtungen aufgrund der Annahmen wie beispielsweise perfekte Kraftübertragung, linear-elastisches Materialverhalten oder ideale Faser-Matrix-Haftung die wahren Kennwerte der Lamine höher einzuschätzen als die Gemessenen.

In der Literatur konnte bei der Verwendung von Naturfasern eine erhöhte Dämpfung festgestellt werden [4, 5]. Dies konnte mit eigens ermittelten Messungen an einem Impedanzrohr nicht bestätigt werden, da die Validität und damit die Aussagekraft dieser Messungen nicht sichergestellt werden konnte.

---

## 9 Ausblick

Im Allgemeinen sollten die Ergebnisse dieser Arbeit je nach Belastungsfall für ein Bauteil gesondert betrachtet werden, da unterschiedliche Verringerungen der mechanischen Eigenschaften auftreten. Der Vorteil der Verkürzung der Produktionszeit steht dem gegenüber. Im Folgenden werden in dieser Arbeit nicht betrachtete Parameter, welche für die Anwendung von Hybridverbunden interessant sein können, vorgestellt.

Der potentielle Vorteil einer erhöhten Dämpfung durch die beiden Naturfaserlagen kann hier nicht gezeigt werden. Dafür kommen Messungen mittels Impedanzrohr für die frequenzabhängige Dämpfung oder eine frei gedämpfte Schwingung über einen Torsionspendel in einer DMA infrage.

Zudem kann untersucht werden, ob eine Naturfaserlage ausreicht, um eine ähnliche Zeitersparnis für die Infusion zu erreichen. Dies kann zu einer Verringerung der Unterschiede zum Kohlefaserlaminat führen.

Die verwendete Messmethode für die Zugsteifigkeiten weist einen potentiellen Nachteil bei der Betrachtung von Hybridverbunden auf. Die Messergebnisse sprechen dafür, dass die Dehnung nicht der des gesamten Laminats entspricht, sondern vermehrt der der äußersten Lage. Um dies genauer zu untersuchen, ist eine Computertomographie während des Zugversuchs sinnvoll. Damit kann die Dehnung über die gesamte Dicke des Verbunds betrachtet werden.

Durch die Kompaktierung der Naturfasern kann es dazu kommen, dass die Faser-Matrix-Haftung verschlechtert wird. Die Messung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit kann Aufschlüsse über die Faser-Matrix-Haftung von kompaktierten Naturfaserlagen liefern.

## Literatur

- [1] G. W. Ehrenstein, "Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften," *Hanser Verlag*, 2006.
- [2] AVK - Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e. V., "Handbuch Faserverbund-kunststoffe/Composites - Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen," *Springer Verlag*, 2014.
- [3] Teboho/Mokhothu/Mtibe/Sadiku, "Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review," *eXSPRESS Polymer Letters*, 2018.
- [4] Kröger/Mock/Greb/Gries, "Damping Properties of Hybrid Composites Made from Carbon, Vectran, Aramid and Cellulose Fibers," *Journal of Composite Science*, 2022.
- [5] Kumar/Vishnuvardhan/Rahul, "Experiment on Acoustic and Vibration Damping Properties of Natural Fiber Reinforced Composites," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2019.
- [6] C. Cherif, "Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren- Materialien - Eigenschaften," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2011.
- [7] Neitzel/Breuer/Mitschang, "Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung," *Hanser Verlag*, 2004.
- [8] D. Abliz, "Functionalization of Fiber Composites with Nanoparticle-Modified Resin Systems," *Dissertation an der TU Clausthal: Papierflieger Verlag*, 2018.
- [9] Bcomp, "Product Data Sheet ampliTex Art. No. 5025," *bcomp.ch*, 2016.
- [10] H. Schürmann, "Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden," *Springer Verlag*, 2007.
- [11] A. Krimmer, "Mikromechanische Modellierung von Fasergelege-Kunststoff-Verbunden auf Basis von Normprüfungen unter Berücksichtigung der in-situ-Eigenschaften," *Universitätsverlag der TU Berlin*, 2013.
- [12] K. Kenzlers, "Composites mit vorkompaktierten Flachsfasergelegen – Untersuchung des textilen Materialverhaltens und der resultierenden mechanischen Eigenschaften," *TU Clausthal*, 03.09.2021.
- [13] Chatzigeorgiou/Feiler/Aoki, "Machbarkeitsstudie zum Prozessmonitoring von Vakuuminfusionsverfahren mittels Lockin Thermografie," *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.*, 2003.

- [14] J. Bai, “Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications,” *Woodhead Publishing*, 2013.
- [15] Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, “Digitale Bildkorrelation,” <https://www.gom.com/de-de/themen/digitale-bildkorrelation>, aufgerufen am 10.05.2024.
- [16] Normenausschuss Kunststoffe, Normenausschuss Luft- und Raumfahrt, “Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften DIN EN ISO 14125,” *Deutsches Institut für Normung*, 2011.
- [17] Ehrenstein/Riedel/Trawiel, “Thermal Analysis of Plastics - Theory and Practice,” *Hanser Verlag*, 2004.
- [18] TU-Dresden Professur für Luftfahrzeugtechnik, “eLamX,” <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ilr/lft/elamx2/elamx>, aufgerufen am 12.05.2024.
- [19] Westlake, “Technical Data Sheet EPIKOTE Resin MGS RIMR035c,” *swiss-composites.ch*, 2022.
- [20] B. Ellis, “Chemistry and Technology of Epoxy Resins,” *Springer - Science and Media*, 1993.
- [21] Wang/Wang/Xian, “The influence of stacking sequence on the low-velocity impact response and damping behavior of carbon and flax fabric reinforced hybrid composites,” *Elsevier*, 2021.
- [22] Grellmann/Seidler, “Kunststoffprüfung,” *Hanser Verlag*, 2011.
- [23] A. George, “Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies,” *Universität Stuttgart*, 2011.
- [24] Hacotech, “Materialkennwerte für das UD-Gelege C300U,” *Telefonisches Gespräch mit Hacotech*, 28.03.2024.
- [25] Franz/Schleich/Wartzack, “Variation analysis of design parameters of fibre-reinforced plastic,” *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, 2019.