

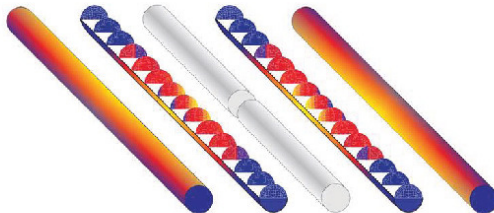


Andreas Klisch (Autor)

**Charakterisierung und Simulation  
mikromechanischer Versagensmechanismen in  
polymeren Faserverbundwerkstoffen**

Andreas Klisch

**Charakterisierung und Simulation  
mikromechanischer  
Versagensmechanismen in polymeren  
Faserverbundwerkstoffen**



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2660>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

## Inhaltsverzeichnis

|       |  |      |
|-------|--|------|
|       | Verwendete Formelzeichen .....                             | VIII |
| 1     | Einleitung .....   | 1    |
| 2     | Grundlagen .....   | 3    |
| 2.1   | Polymere Verbundwerkstoffe .....                           | 3    |
| 2.1.1 | Lastübertragung zwischen Faser und Matrix .....            | 4    |
| 2.1.2 | Lastübertragung zwischen benachbarten Fasern .....         | 8    |
| 2.2   | Statistik der Faserfestigkeit .....                        | 12   |
| 2.2.1 | Fehlerarten und Fehlerdichte .....                         | 12   |
| 2.2.2 | Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik .....            | 13   |
| 2.2.3 | Weibullverteilung .....                                    | 15   |
| 2.3   | Thermische Ausdehnung und Eigenspannungen .....            | 18   |
| 2.4   | Finite Elemente Methode .....                              | 21   |
| 3     | Untersuchungsmethoden .....                                | 30   |
| 3.1   | Verwendete Materialien .....                               | 30   |
| 3.2   | Mechanische und thermische Analysemethoden .....           | 34   |
| 3.2.1 | Zug- und Druckversuche .....                               | 34   |
| 3.2.2 | Thermo-mechanische Messungen .....                         | 36   |
| 3.2.3 | Bündelzugversuche .....                                    | 37   |
| 3.3   | Spannungsoptik .....                                       | 41   |
| 3.4   | Fluoreszenz- und Laser-Raman-Spektroskopie .....           | 45   |
| 3.5   | FEM-Modelle .....  | 49   |
| 3.5.1 | Modell mit einer Faser (debonding) .....                   | 50   |
| 3.5.2 | Modelle mit einer Faser (thermische Eigenspannungen) ..... | 51   |
| 3.5.3 | Modell mit mehreren Fasern (Bündelzugversuch) .....        | 52   |
| 3.5.4 | Modell mit mehreren Fasern (Lastübertragung) .....         | 53   |
| 3.5.5 | Modell mit mehreren Fasern (UD-Laminat) .....              | 54   |
| 4     | Ergebnisse .....   | 56   |
| 4.1   | Experimentelle Resultate .....                             | 56   |
| 4.1.1 | Zug- und Druckversuche .....                               | 56   |
| 4.1.2 | Thermo-mechanische Messungen .....                         | 64   |
| 4.1.3 | Bündelzugversuche .....                                    | 68   |
| 4.1.4 | Spannungsoptik .....                                       | 76   |
| 4.1.5 | Laser-Fluoreszenz-Spektroskopie .....                      | 77   |
| 4.2   | FEM-Modelle .....  | 88   |
| 4.2.1 | Modell mit einer Faser (debonding) .....                   | 88   |
| 4.2.2 | Modelle mit einer Faser (thermische Eigenspannungen) ..... | 89   |
| 4.2.3 | Modell mit mehreren Fasern (Bündelzugversuch) .....        | 95   |
| 4.2.4 | Modell mit mehreren Fasern (Lastübertragung) .....         | 96   |
| 4.2.5 | Modell mit mehreren Fasern (UD-Laminat) .....              | 102  |
| 5     | Diskussion .....   | 106  |
| 5.1   | Matrixeigenschaften .....                                  | 107  |
| 5.2   | Thermische Eigenspannungen .....                           | 108  |
| 5.3   | Statistische Faserfestigkeitsverteilung .....              | 109  |
| 5.4   | Modellverbunde .....                                       | 111  |
| 5.5   | UD-Laminat .....   | 120  |
| 6     | Zusammenfassung und Ausblick .....                         | 125  |
| 7     | Literaturverzeichnis .....                                 | 126  |

---

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 8     | Anhang .....                       | 136 |
| 8.1.  | Verwendete Hard- und Software..... | 136 |
| 8.2.  | Verwendete Subroutines .....       | 138 |
| 8.2.1 | HYPELA .....                       | 138 |
| 8.2.2 | PLOTV .....                        | 152 |
| 8.2.3 | USPRING.....                       | 153 |