

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|--------------|
| Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis | xi |
| Bildverzeichnis..... | xv |
| Tabellenverzeichnis | xxiii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit | 3 |
| 2 Stand der Technik und Forschung | 7 |
| 2.1 Theoretische Grundlagen..... | 7 |
| 2.1.1 Einführung in die Kontinuumsmechanik..... | 7 |
| 2.1.1.1 Spannungen..... | 8 |
| 2.1.1.2 Verzerrungen..... | 11 |
| 2.1.1.3 Sonderfälle der Anisotropie in der Elastizität | 12 |
| 2.1.2 Einführung in die Schädigungsmechanik..... | 13 |
| 2.1.3 Einführung in die Betriebsfestigkeit | 18 |
| 2.1.4 Versagenskriterien faserverstärkter Kunststoffe | 22 |
| 2.2 Eigenschaften und Herstellung kurzfaser verstärkter Thermoplaste..... | 25 |
| 2.2.1 Spritzgießen thermoplastischer Werkstoffe | 26 |
| 2.2.2 Einfluss des Fertigungsprozesses auf die Bauteileigenschaften kurzfaser verstärkter Thermoplaste..... | 28 |
| 2.2.3 Spritzgussimulation zur Vorhersage von Faserorientierungen | 30 |
| 2.3 Ansätze der Crashsimulation kurzfaser verstärkter Thermoplaste..... | 33 |
| 2.3.1 Modellierung mittels isotropen Materialmodellen..... | 35 |
| 2.3.2 Integrative Simulation kurzfaser verstärkter Thermoplaste..... | 39 |
| 2.3.2.1 Mikromechanische Modellierung des Materialverhaltens..... | 40 |
| 2.3.2.2 Schichtmodellierung nach Schöpfer sowie Gruber und Watzack | 47 |
| 2.3.2.3 Anisotrop-elastisch-plastische Modellierung..... | 51 |
| 2.4 Ermüdungsverhalten faserverstärkter Kunststoffe | 54 |
| 2.4.1 Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten | 55 |
| 2.4.2 Materialdegradation nach zyklischer Beanspruchung.... | 60 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3 | Handlungsbedarf und Forschungsfragen..... | 67 |
| 4 | Ansatz zur Berücksichtigung der Materialdegradation in der Crashsimulation | 71 |
| 4.1 | Herleitung der Teilschritte und Einordnung des Ansatzes..... | 71 |
| 4.2 | Charakterisierung und Modellierung von Materialverhalten und Materialdegradation | 75 |
| 4.3 | Bestimmung der Schädigungsverteilung im Bauteil..... | 77 |
| 4.4 | Beschreibung der Materialparameter nach Vorschädigung..... | 79 |
| 4.5 | Konsistenz des Ansatzes zu aktuellen Verfahren | 82 |
| 5 | Eingesetzter Werkstoff sowie Prüf- und Auswertemethoden . | 85 |
| 5.1 | Werkstoff und Probengeometrien..... | 85 |
| 5.1.1 | Probengeometrie für zyklische und hochdynamische Zugversuche..... | 85 |
| 5.1.2 | Kreuzrippenträger zur Validierung im Biegeversuch | 87 |
| 5.2 | Untersuchung des Ermüdungsverhaltens | 89 |
| 5.2.1 | Funktionsweise servohydraulischer Pulser | 90 |
| 5.2.2 | Temperaturrentwicklung im zyklischen Versuch | 91 |
| 5.2.3 | Vorgehen zur Ermittlung von Wöhlerlinien | 94 |
| 5.3 | Bestimmung crashrelevanter Materialkennwerte..... | 96 |
| 5.3.1 | Funktionsweise servohydraulischer Hochgeschwindigkeitsprüf anlagen | 98 |
| 5.3.2 | Kraftmessung in hochdynamischen Versuchen..... | 99 |
| 5.4 | Optische Dehnungsmessung | 102 |
| 5.4.1 | Funktionsweise der digitalen Bildkorrelation (DIC) | 102 |
| 5.4.2 | Einsatz der DIC im zyklischen Experiment..... | 106 |
| 5.4.3 | Einsatz der DIC im hochdynamischen Experiment | 108 |
| 5.5 | Kalibrierung von Materialmodellen für die Simulation | 109 |
| 5.5.1 | Kennwertermittlung aus experimentellen Daten | 110 |
| 5.5.2 | Materialparameteridentifikation durch Reverse Engineering und Optimierung..... | 112 |
| 5.6 | Zusammenfassung und Diskussion der eingesetzten Prüfmethoden..... | 116 |
| 6 | Ergebnisse der Charakterisierung auf Proben-Ebene..... | 119 |
| 6.1 | Kennwerte der ungeschädigten Materialproben | 119 |
| 6.2 | Ergebnisse der durchgeführten zyklischen Versuche..... | 121 |
| 6.2.1 | Maximal ertragbare Schwingspielzahlen..... | 122 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 6.2.2 | Schädigungszuwachs..... | 126 |
| 6.2.3 | Vorschädigung von Proben und Validierung der Schädigungsvorhersage | 131 |
| 6.3 | Beeinflussung des Materialverhaltens infolge Vorschädigung..... | 134 |
| 6.3.1 | Restfestigkeiten vorgeschädigter Proben | 134 |
| 6.3.2 | Einbindung in die Simulation | 136 |
| 6.4 | Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse | 139 |
| 7 | Validierung des Ansatzes am Beispiel biegebeanspruchter Kreuzrippenträger | 141 |
| 7.1 | Validierung der maximal ertragbaren Schwingspielzahlen.... | 142 |
| 7.2 | Validierung des Schädigungszuwachses | 145 |
| 7.3 | Validierung der Bruchkraft im Durchstoßversuch | 149 |
| 7.4 | Zusammenfassung und Beurteilung der Modellvorhersagen.. | 152 |
| 8 | Diskussion der Grenzen des vorgestellten Ansatzes..... | 155 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 157 |
| 10 | Summary and outlook..... | 161 |
| | Anhang..... | 165 |
| | Ergänzungen zum Kapitel 5 | 165 |
| | Ergänzungen zum Kapitel 6 | 168 |
| | Literaturverzeichnis..... | 173 |