

SymbolverzeichnisV

1 Einleitung 1

2 Festigkeitsbewertung unter automobilen Randbedingungen..... 3

2.1 Festigkeitsanforderungen an Serien-PKW 3

2.1.1 Einfluss von CFK/Metall-Mischbauweise auf die Ableitung von Betriebslastannahmen..... 5

2.1.2 Einfluss der Werkstoffstreuung von CFK auf die Umrechnung der Versagenswahrscheinlichkeit für experimentelle Festigkeitsversuche 8

2.1.3 Sonderlasten und Missbrauch 10

2.1.4 Umwelteinflüsse 10

2.2 Numerische Bewertungsmethodik für PKW-Strukturbauteile 11

2.2.1 Sonderlasten und Missbrauch 11

2.2.2 PKW-Betriebslasten..... 12

2.2.3 Bewertung der Betriebsfestigkeit mittels einstufiger Ersatzlastfälle 14

2.3 Zur Übertragbarkeit von Nachweismethoden aus der Luftfahrt- und Windkraftanlagenindustrie 15

2.4 Schwerpunkte dieser Arbeit..... 16

3 Statische und zyklische Versagensmechanismen von CFK 17

3.1 Faserbruch – Diskussion der Versagensmechanismen 18

3.2 Zwischenfaserbruch – Diskussion der Versagensmechanismen..... 20

3.3 Zusätzliche Schädigungsmechanismen einer UD-Schicht im Laminat..... 23

3.4 Definition nicht zulässiger Schäden 28

4 Konzept zur schichtenweisen Lebensdauerbewertung unter PKW-Betriebslasten 31

4.1 Auswahl der Betriebsfestigkeitsmethoden..... 33

4.2 Kennwertermittlung/Einstufenversuche 34

4.2.1 Probekörperauswahl und Versuchsaufbau..... 34

4.2.2 Ermittlung der statischen Festigkeitskennwerte 40

4.2.3 Einfluss von Temperatur und Alterung auf die Querkzug-Festigkeitseigenschaften einer CFK-UD-Schicht 41

4.2.4 Auswahl der Wöhlerkurvenformulierung für CFK-UD-Schichten..... 43

4.2.5 Physikalisch begründete Einteilung des Haigh-Diagramms zur Festlegung des Versuchsumfangs..... 45

4.2.6 Quer-Zug/Druck – ermittelte Wöhlerkurven..... 46

4.2.7 Quer-Längs-Schub – ermittelte Wöhlerkurven 49

4.3 Formulierung des Mittelspannungseinflusses..... 51

4.3.1	Wöhlerkurvenparameterbezogene Formulierung des Haigh-Diagramms	52
4.3.2	Quer-Zug/Druck-Haigh-Diagramm einer CFK-UD-Schicht	53
4.3.3	Quer-Längs-Schub-Haigh-Diagramm einer CFK-UD-Schicht	54
4.4	Anwendung der linearen Schadensakkumulation	55
4.4.1	Überprüfung der Anwendbarkeit der Miner-Regel für Quer-Zug/Druck und Bruchmodus A	55
4.4.2	Einfluss von Omission auf den effektiven Schädigungswert	58
4.4.3	Bewertung der Restfestigkeit auf Basis linearer Schadensakkumulation	60
4.4.4	Bewertung der Riss sättigung im Laminat	63
4.4.5	Einfluss der zyklischen Werkstoffnichtlinearität auf die Prognosegüte der schichtenweisen Lebensdauerbewertung	71
5	Prototypische Umsetzung des Konzepts in die automobilen Standardabläufe	79
5.1	Bewertungsablauf für Sonder- und Missbrauchereignisse	79
5.2	Lebensdauerabschätzung von CFK-Strukturen mittels einstufiger Ersatzlastfälle	83
5.2.1	Schichtenweise Lebensdauerbewertung unter proportionalen Einstufenlasten	84
5.2.2	Zur Bewertung räumlicher Spannungszustände	90
5.2.3	Implementierung mittels einer Abaqus-User-Subroutine	91
5.3	Auslegung und Festigkeitsbewertung am Beispiel eines CFK-Al-Hybrid-Stabilisators	93
5.4	Umsetzung der schichtenweisen Lebensdaueranalyse in den Standardprozess der Gesamtfahrzeugbewertung	97
5.4.1	Umsetzung in Standardsoftware	99
5.4.2	Zur Berücksichtigung nichtproportionaler Beanspruchungen	100
6	Zur numerischen Bewertung von CFK-Verbindungstechnik	107
6.1	Zur Bewertung punktueller Verbindungstechnik im Karosserie-Mischbau	109
6.2	Zur Berücksichtigung von CFK-Versagensmechanismen in der Bewertung von Klebstoffverbindungen	113
7	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis	125
	Anhang	133
A	Messwerte	133
B	Interpolations-Koeffizienten der Haigh-Diagramme	141
C	Entwurf eines Klassierverfahrens zur Erkennung synchroner Belastungen	143
D	Kalibrierung von Klebstoff- und Delaminationsmodellen	144
E	FEM-Ersatzmodell einer CFK-Al-Klebstoffverbindung	145