

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	v
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-Strukturauteile	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 Querzug-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 Rissättigung 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 Missbrauchsereignisse	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 Gesamtfahrzeuggbewertung	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 Klasserverfahrens zur Erkennung synchroner Belastungen	143
D	Kalibrierung von Klebstoff- und Delaminationsmodellen.....	144
E	FEM-Ersatzmodell einer CFK-Al-Klebstoffverbindung	145