

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Hinführung zum Thema	11
1.2	Übersicht zur vorliegenden Arbeit	13
2	Faserverbundwerkstoffe	15
2.1	Hintergrund	15
2.2	Verstärkungsfasern	17
2.2.1	Aramidfasern	20
2.2.2	Basaltfasern	21
2.2.3	Glasfasern	23
2.2.4	Kohlenstofffasern	25
2.2.5	Polyethylenfasern	28
2.3	Matrixwerkstoffe	30
2.3.1	Thermoplastische Matrixwerkstoffe	31
2.3.2	Duroplastische Matrixwerkstoffe	31
2.3.3	Metallische Matrixwerkstoffe	32
2.4	Fertigungsverfahren	32
2.4.1	Handlaminierverfahren	33
2.4.2	Harztransferverfahren	34
2.4.3	Prepregverfahren	35
2.4.4	Textile Vorformlingstechnologien	37
2.5	Dimensionierung von Faserverbundwerkstoffen	38
2.5.1	Generelle Richtlinien für die Laminatgestaltung	38
2.5.2	Dimensionierung mit Laminatfamilien	39
2.5.3	Dimensionierung mit variablen Faserorientierungen	41
2.6	Laminatberechnung	42

2.6.1	Mischungsregeln	42
2.6.2	Allgemeines Elastizitätsgesetz	43
2.6.3	Bestimmung der Laminatsteifigkeitsmatrix	46
2.6.4	Klassische Laminattheorie	47
2.7	Faserverbundspezifische Struktureigenschaften	49
2.7.1	Anisotropie der mechanischen Eigenschaften	49
2.7.2	Kerbempfindlichkeit	50
2.7.3	Umweltdegradation	51
2.7.4	Streuung der Festigkeitseigenschaften	51
2.7.5	Schlagbeständigkeit	51
2.7.6	Dauerfestigkeit	52
2.8	Anforderungen des Automobilbaus	52
2.8.1	Strukturkonzepte	53
2.8.2	Oberflächenqualität	55
2.8.3	Temperatureinfluss	59
2.8.4	Korrosionsbeständigkeit	60
2.8.5	Fertigung	60
2.8.6	Recycling	61
2.8.7	Faserqualität	61
3	Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen	63
3.1	Der E-Modul als charakteristische Werkstoffgröße	63
3.1.1	Bedeutung des Faservolumengehalts	63
3.1.2	Variabilität des E-Moduls	65
3.1.3	Einfluss der Laminatdimension	66
3.1.4	Hybrid-Verbundwerkstoffe	69
3.2	Wärmeausdehnungskoeffizient α	71
3.3	Praktische Kennwertermittlung	73
3.3.1	Untersuchte Parameter	73
3.3.2	Untersuchte Lamine	73

3.3.3	Probenerstellung	74
3.3.4	Zugversuche und Auswertung	75
4	Auswahl von Bauteilen für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Fahrzeugbau	83
4.1	Auswahlkriterium „Bauteilposition im Fahrzeug“	84
4.2	Auswahlkriterium „Marketing“	85
4.3	Auswahlkriterium „Integralbauweise“	86
4.4	Auswahlkriterium „Fertigungstechnik“	87
4.5	Auswahlkriterium „Stückzahlscenario“	87
4.6	Auswahlkriterium „Energieabsorption“	88
4.7	Auswahlkriterium „Strukturelle Bauteileignung“	90
5	Definition eines Anisotropie-Kennwertes	93
5.1	Theoretischer Ansatz	93
5.1.1	Vorgehensweise	93
5.1.2	Basisdaten	94
5.1.3	Beschreibung von Spannungszuständen im Element	95
5.1.4	Rahmenbedingungen	99
5.2	Elementabhängige Kennwertdefinition	102
5.3	Elementunabhängige Kennwertdefinition	106
5.3.1	Hauptnormalspannungsfaktor	106
5.3.2	Orientierungsfaktor	109
5.3.3	Gewichtungsfaktor	114
5.3.4	Elementkennwert	117
5.3.5	Bauteilkennwert	118
6	Umsetzung des Anisotropie-Kennwertes zur Anisotropie-Analyse	121
6.1	Ansatz	121
6.2	Verwendete Programme	121
6.3	FEM-Operationen	122
6.3.1	Berechnungsvorbereitung	122

6.3.2	Simulation	123
6.3.3	Datenausgabe	123
6.4	Datenverarbeitung	125
6.4.1	Auswahl der benötigten Daten	125
6.4.2	Bestimmung der Mittelebenenspannung	126
6.4.3	Bestimmung der Orientierung der Mittelebenenspannung	127
6.4.4	Korrektur der Hauptnormalspannungsorientierung	128
6.4.5	Ermitteln des Elementreferenzwinkels	129
6.4.6	Berechnung der Elementkennwerte	130
6.4.7	Berechnung der Bauteilkennwerte	130
6.4.8	Bestimmung der durchschnittlichen Winkelabweichung	131
6.4.9	Bestimmung des Hauptnormalspannungsverhältnisses	132
6.5	Ergebnisse	132
6.5.1	Tabellarische Darstellung	132
6.5.2	Graphische Darstellung	132
7	Anwendung der Anisotropie-Analyse auf automobile Karosseriestrukturen	135
7.1	Einsatzmöglichkeiten der Anisotropie-Analyse	135
7.2	Darstellung und Validierung der Prozesskette	140
7.2.1	Anisotropie-Analyse und Bauteilauswahl	141
7.2.2	Vordimensionierung des Referenzbauteils	142
7.2.3	Berechnung des Referenzbauteils	144
7.2.4	Bauteilerstellung	146
7.2.5	Bauteilprüfung	146
7.3	Bewertung der Anisotropie-Analyse	148
8	Zusammenfassung	151
8.1	Darstellung der Ergebnisse	151
8.2	Ausblick	152
	Literaturverzeichnis	155