

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einführung in die Sandwichbauweise	3
2.1	Das Sandwichprinzip	3
2.2	Sandwichanwendungen	5
2.3	Materialien und Technologie	7
2.3.1	Deckschicht	7
2.3.2	Kern	8
2.3.3	Klebschicht	9
2.3.4	Herstellungsverfahren	10
2.4	Lasteinleitung und integrierte Verstärkungselemente	12
2.5	Schadenstoleranz von Sandwichverbunden	15
2.6	Rissstopper in Sandwichverbunden	18
3	Sandwichversagensarten und -hypothesen	21
3.1	Stabilitätsversagen	21
3.2	Versagen der Faserverbund-Deckschicht	23
3.3	Schaumkernversagen	26
3.4	Deckschichtablösung	28
3.4.1	Grundlagen der Bruchmechanik	29
3.4.2	Riss zwischen zwei unterschiedlichen Materialien	32
3.4.3	Bruchkriterien	35
3.4.4	Ermüdungsrisswachstum	36
3.4.5	Numerische Methoden in der Bruchmechanik	39
3.4.6	Virtual Crack Closure Technique	41
4	Mechanische Grundcharakterisierung der Sandwichstruktur	45
4.1	Verwendete Materialien	45
4.2	Experimente	47
4.2.1	Deckschicht-Zugversuch	47
4.2.2	Druckversuch in Sandwichdickenrichtung	47
4.2.3	Schubversuch in Sandwichdickenrichtung	47
4.2.4	4-Punkt-Biegeversuch	48

4.3	Ergebnisse	50
4.3.1	Deckschicht-Zugversuch	50
4.3.2	Druckversuch	50
4.3.3	Schubversuch	51
4.3.4	4-Punkt-Biegeversuch	52
4.4	Simulation des 4-Punkt-Biegeversuchs	54
4.4.1	FEM-Modellierung	54
4.4.2	Vergleich der Versagenskriterien	55
4.4.3	Einfluss von Temperatureigenspannungen	55
5	Temperatureigenspannungen in CFK-Schaum-Sandwichstrukturen	57
5.1	Ursachen und Entstehung	58
5.1.1	Wärmedehnungsverhalten der Sandwichkomponenten	58
5.1.2	Herstellungsprozess	62
5.2	Krümmungsmessung an Sandwichproben	62
5.2.1	Verwendete Materialien	63
5.2.2	Numerische Berechnung zur Eigenspannungsmessung	63
5.2.3	Messanordnung und Versuchsdurchführung	65
5.2.4	Experimentelle Ergebnisse	66
6	Rissausbreitung zwischen Deckschicht und Kern	71
6.1	Versuchsaufbau und Probengeometrie	72
6.1.1	DCB-Test	72
6.1.2	ENF-Test	73
6.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	73
6.2.1	Bestimmung der Risslänge	74
6.2.2	Berechnung der Energiefreisetzungsraten	77
6.2.3	FEM-Modellierung	78
6.3	Rissausbreitung unter quasi-statischer Last	79
6.3.1	Experimentelle Ergebnisse	79
6.3.2	Konvergenzuntersuchung und Reibungseffekte	80
6.3.3	Nachgiebigkeitsmethode zur Bestimmung der Risslänge	82
6.3.4	Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsraten	83
6.3.5	Untersuchungen zum Einfluss der Deckschichtdicke	85
6.4	Ermüdungsrißwachstum unter Wechselleast	88
6.4.1	Ermüdungsrißwachstum unter globaler Mode-I- und Mode-II-Last	88
6.4.2	Ermüdungsrißwachstum bei unterschiedlichen Deckschichtdicken	92
7	Biegeversuche an schlaggeschädigten Sandwichstrukturen	95
7.1	Versuchsaufbau und Probengeometrie	95

7.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	97
7.3	FEM-Modellierung	98
7.4	Quasi-statischer Belastungsversuch	100
7.5	Ermüdungsversuch unter zyklischer Wechselbelastung	102
8	Rissstoppelemente in CFK-Schaum-Sandwichstrukturen	105
8.1	Versuchsaufbau und Probengeometrie	105
8.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	106
8.3	Nachgiebigkeitsmethode bei verstärkten Sandwich-Proben	106
8.4	Rissstoppwirkung von Kasten- und Doppel-T-Profil	107
8.5	Riss spitzenbelastung vor und hinter der Rissstopperlinie	111
9	Zusammenfassung	113
A	Riss zwischen orthotropen Materialien	116
B	Verwendete Sandwichstrukturen	118
C	Rissfortschrittsdiagramme	122
D	Delaminationsfrontbelastungen im 3- und 4-Punkt-Biegeversuch	126
E	Risswachstumsdiagramme mit Rissstoppelementen	128