

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Stand der Technik	2
1.2.1 Dämpfungsverhalten von Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden	3
1.2.2 Schallabstrahlung dünnwandiger Bauteile	5
1.3 Motivation und Zielsetzung	7
1.4 Materialien und Versuchsplanung	9
2 Amplitudenabhängige Dämpfung von MKV	13
2.1 Quasistatische Grundcharakterisierung hybrider Mehrschichtverbunde	14
2.1.1 Mechanisches Verhalten der Deckschichten	14
2.1.2 Schubdeformationsverhalten der Kunststoffmittellagen	15
2.1.3 Quasistatische Biegeprüfung der Verbunde	17
2.1.4 Optische Schichtdickenbestimmung	19
2.1.5 Dictheermittlung	21
2.2 Experimentelle Dämpfungsermittlung mittels Biegeschwingungen	21
2.2.1 Freie Biegeschwingungen von Balken	21
2.2.2 Versuchsaufbau des Ausschwingversuchs	22
2.2.3 Ermittlung des amplitudenabhängigen Dämpfungverhaltens .	23
2.2.3.1 Globale Auswertung der gesamten Hüllkurve	23
2.2.3.2 Lokale Ermittlung unter Berücksichtigung der Auslenkung	26
2.3 Dehnungsenergiebasierte Homogenisierung der Dämpfung	29
2.3.1 Dehnungsenergie und Dehnungsenergiedichte	29
2.3.2 Numerische Ermittlung der Dehnungsenergie an Werkstoffverbunden	31
2.3.3 Energieäquivalente Ermittlung der Verbunddämpfung	35
2.3.3.1 Energetische Analyse akustisch sensitiver Bauteile .	35

2.3.3.2	Bauteilspezifische Versuche zur Dämpfungsermittlung	37
2.4	Fazit der nicht-linearen bauteilspezifischen Dämpfungsanalyse	40
3	Anisotrope Dämpfung von Faser-Kunststoff-Verbunden	43
3.1	Dämpfungsmodelle für Verbunde mit mehreren anisotropen Einzelschichten	43
3.1.1	Allgemeine Laminat-Beschreibung	43
3.1.2	Anisotropes Dämpfungsmodell von Ni-Adams	45
3.1.3	Erweitertes Dämpfungsmodell nach Saravanos-Chamis	46
3.2	Werkstoffauswahl	49
3.3	Experimentelle Ermittlung der anisotropen Dämpfung	50
3.4	Inverse Identifikation der Dämpfungsparameter	52
3.5	Gegenüberstellung der ermittelten Werkstoffkennwerte	54
3.6	Anisotrope Dämpfung und Steifigkeit	55
3.6.1	Einfluss des Matrixmaterials	57
3.6.2	Wirkung des Fasermaterials	58
3.6.3	Wertebereich aller untersuchten FKV	59
3.7	Implementierung der Dämpfungsmodelle in FEM-Berechnungen	61
3.7.1	Verifikation anhand von Balken	62
3.7.2	Erweiterte Überprüfung an Platten	65
3.7.3	Anwendung der Dämpfungsmodelle auf ein Formteil	68
4	Berechnung und Optimierung der abgestrahlten Schallleistung	71
4.1	Schnellebasierte Berechnungsmethoden der Schallleistung	71
4.1.1	Äquivalente abgestrahlte Schallleistung (ERP)	71
4.1.2	Lumped Parameter Model (LPM)	72
4.1.3	Volumengeschwindigkeit (PVV)	73
4.1.4	Kinetische Energie und Eingangsleistung	74
4.1.5	Akustischer Wirkungsgrad und akustische Dämpfung	74
4.1.6	FEM-Implementierung der Schallleistungsmaße	75
4.1.7	Anwendung der Schallleistungsberechnung auf ein Formteil	76
4.2	Analytische Beschreibung der frequenzabhängigen Schallleistung	80
4.2.1	Charakteristische Abstrahlung einer Mode	80
4.2.2	Vergrößerungsfunktionen der modalen Schallleistung	82
4.2.3	Semi-analytische Bestimmung der frequenzabhängigen Schallleistung	86

4.3	Mittlere Schallleistung im Frequenzbereich	89
4.3.1	Numerische Integration bei nicht-äquidistanten Stützstellen	89
4.3.2	Analytische Ermittlung der mittleren modalen Schallleistung	90
4.4	Konvergenzbetrachtungen der modalen Schallleistung	92
4.4.1	Steuerung der Frequenzschrittweite	92
4.4.2	Richtlinien zur eigenfrequenzbasierten Schrittweitendefinition	94
4.4.3	Allgemeine Richtlinien zur Schrittweitendefinition	97
4.5	Vibro-akustische Optimierung eines Laminataufbaus	98
4.5.1	Problembeschreibung und Modellbildung	98
4.5.2	Zielfunktion und Implementierung im Optimierungsalgorithmus	99
4.5.3	Minderung der Schallabstrahlung durch Materialsubstitution	100
4.5.4	Einfluss der Dämpfung auf die abgestrahlte Schallleistung . .	100
4.5.5	Optimierungspotential durch Änderung des Laminataufbaus .	102
4.6	Fazit der Schallabstrahlungsberechnung und -optimierung	104
5	Strukturintensität als Mittel zur Bewertung akustischer Quellen	105
5.1	Theoretische Grundlagen	106
5.2	FEM-Modellbildung und STI-Implementierung	107
5.3	Validierung am Kragbalkenmodell	109
5.4	Anwendungsbeispiel: MSV-Ölwanne	112
6	Schlussfolgerungen	115
7	Zusammenfassung und Ausblick	119
Abbildungsverzeichnis		121
Tabellenverzeichnis		129
Literaturverzeichnis		131
A	Anhang	145
A.1	Kennwertübersicht von MSV mit schubweichen Mittellagen	145
A.2	Kraft-Verschiebungs-Kurven der Drei- und Vier-Punkt-Biegeversuche	149
A.3	Experimentelle Ermittlung der Dämpfungskoeffizienten der FKV . .	151
A.4	Vergrößerungsfunktionen der Schallleistung und deren Integrale . .	162