

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Amplitudenabhängige Dämpfung von MKV</b>	<b>13</b>
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	Dichteermittlung . . . . .	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 Dämpfungsverhaltens . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Anisotrope Dämpfung von Faser-Kunststoff-Verbunden</b>	<b>43</b>
3.1	Dämpfungsmodelle für Verbunde mit mehreren anisotropen Einzel- schichten . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Berechnung und Optimierung der abgestrahlten Schalleistung</b>	<b>71</b>
4.1	Schnellebasierte Berechnungsmethoden der Schalleistung . . . . .	71
4.1.1	Äquivalente abgestrahlte Schalleistung (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 Schalleistungsmaße . . . . .	75
4.1.7	Anwendung der Schalleistungsberechnung auf ein Formteil .	76
4.2	Analytische Beschreibung der frequenzabhängigen Schalleistung . .	80
4.2.1	Charakteristische Abstrahlung einer Mode . . . . .	80
4.2.2	Vergrößerungsfunktionen der modalen Schalleistung . . . . .	82
4.2.3	Semi-analytische Bestimmung der frequenzabhängigen Schall- leistung . . . . .	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
<b>5</b>	<b>Strukturintensität als Mittel zur Bewertung akustischer Quellen</b>	<b>105</b>
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
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>119</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>121</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>129</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>145</b>
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