

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	13
1. Übersicht und Stand der Forschung	15
1.1. Motivation	15
1.2. Die Skalierte Rand-Finite-Elemente-Methode (SBFEM)	15
1.3. Literaturübersicht	17
2. Grundlagen für die SBFEM	21
2.1. Klassische Laminattheorie	21
2.1.1. Kinematik	21
2.1.2. Schnittkraftgrößen	22
2.1.3. Konstitutive Gleichungen	22
2.2. Schubdeformationstheorie 1. Ordnung	26
2.2.1. Kinematik	26
2.2.2. Schnittkraftgrößen	27
2.2.3. Konstitutive Gleichungen	27
2.3. Schubkorrekturfaktor	28
2.3.1. Energie bei der Schubdeformationstheorie 1. Ordnung	29
2.3.2. Energie bei der Referenzlösung	29
2.3.3. Vergleich mit anderen Arbeiten	32
2.4. Finite-Elemente-Methode (FEM)	33
2.4.1. Diskretisierung	34
2.4.2. Der Ansatz für die FEM	35
2.4.3. Das Beispiel des Zugstabes	36
2.4.4. Eigenschaften der FEM	37
2.4.5. Verbesserung der Lösung	38
3. Modellierung von Laminat-Leichtbauträgern mit der SBFEM	41
3.1. Segmentierung und Diskretisierung des Querschnitts	41
3.1.1. SBFEM-Ansatz	43
3.2. Aufstellen der SBFEM-Gleichung	44
3.2.1. Anwendung des Prinzips vom Minimum des Gesamtpotentials .	44
3.2.2. Assemblierung von mehreren Elementen	48
3.3. Weitere Elemente für die SBFEM	51
3.3.1. Zylindrisch gekrümmte Elemente	51
3.3.2. Gemischt-Hybride Elemente nach Hellinger-Reissner	53
3.3.3. Elemente nach der klassischen Laminattheorie	57
4. Lösung der SBFEM-Gleichung	59
4.1. Eigenschaften der SBFEM-Gleichung	59

4.2. Lösungsmethoden	60
4.3. Lösung mit Hilfe des (generalisierten) Eigenwertproblems	60
4.3.1. Ansatz für die homogene Lösung	60
4.3.2. Probleme bei der Umsetzung	61
4.4. Lösung mit Hilfe der Matrixexponentialfunktion	61
4.4.1. Ansatz für die homogene Lösung	62
4.4.2. Ansatz für die partikuläre Lösung	64
4.5. Einarbeiten der Randbedingungen	69
5. Beispiele, Analysen und Ergebnisse	71
5.1. Modelle	71
5.2. Ergebnisse für das homogene Problem	73
5.3. Ergebnisse für das inhomogene Problem	76
5.4. Erforderliche Rechenzeit	80
5.4.1. Dauer der einzelnen Rechenschritte	80
5.4.2. Abhängigkeit der Rechenzeit von den Freiheitsgraden	80
5.4.3. Vergleich von FEM und SBFEM	82
6. Generierung von SBFEM-Superelementen	85
6.1. Einleitung	85
6.2. Berechnung der Randsteifigkeitsmatrix	86
6.3. Transformation auf globale Koordinaten	87
6.4. Test des Superelements	87
7. Berechnung von Spannungen	91
7.1. Direkte Rückrechnung auf Schnittgrößen	91
7.1.1. Die Berechnung der Schnittgrößen	91
7.1.2. Probleme bei direkter Rückrechnung	91
7.2. Glättung der Schnittgrößen	93
7.2.1. Lineare Elemente	93
7.2.2. Elemente 5. Ordnung	94
7.3. Probleme bei Eckknoten	94
7.4. Ergebnisse	95
7.4.1. Vergleich mit der FEM	96
7.4.2. Vergleich der verschiedenen SBFEM-Elemente	103
7.4.3. Fazit	105
7.5. Berechnung der Einzelschichtspannungen	106
8. Vergleich mit anderen Methoden	109
8.1. Vergleich mit der generalisierten Vlasov-Theorie	109
8.1.1. Einleitung	109
8.1.2. Ansatz für die generalisierte Vlasov-Theorie	110
8.1.3. Gleichungen der generalisierten Vlasov-Theorie	110
8.1.4. Lösung der Gleichungen	111
8.1.5. Ergebnisse	114
8.2. Vergleich mit der Verallgemeinerten Technischen Biegetheorie	118
8.2.1. Der Ansatz für die Verallgemeinerte Technische Biegetheorie . .	118

8.2.2. Rechenbeispiele	120
A. Ansatzfunktionen	127
A.1. Ansatzfunktionen für die ebenen Elemente	127
A.2. Die Matrix B	129
B. Schubkorrekturfaktor	131
B.1. Ausdrücke für die Spannungen	131
B.2. Ausdrücke für die Energie der „exakten“ Lösung	131
C. Abaqus User-Defined-Element	133
C.1. Definition des User-Defined-Elements	133
C.2. Einbau des Superelements in ein Gesamt-Finite-Elemente-Modell	134
Literaturverzeichnis	135