

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Qualitätssicherung bei additiv gefertigten Luftfahrzeugstrukturen	3
2.1 Additive Fertigung als disruptive Technologie	3
2.2 Qualitätssicherung von additiv gefertigten Luftfahrzeugbauteilen	6
2.2.1 Minimierung von Imperfektionen	6
2.2.2 Prüfverfahren und Qualifikation	10
2.3 Benchmark- und Nachweisproben zur Prozess- und Bauteilcharakterisierung .	11
2.4 Simulation von additiv gefertigten Materialien	13
3 Ansätze zur Erzeugung einer integralen Struktur-Nachweisprobe	17
3.1 Anforderungen an die Nachweisprobe und allgemeine Problemformulierung .	17
3.1.1 Theoretische Beschreibung der Nachweisfähigkeit	18
3.1.2 Ableitung einer Formulierung für das Optimierungsproblem	19
3.1.3 Vorgehen zur Erzeugung einer Struktur-Nachweisprobe	22
3.2 Klassische Ansätze zur Topologieoptimierung	23
3.2.1 SIMP-Verfahren und Sensitivitätsanalyse	25
3.2.2 Weitere Verfahren zur Topologieoptimierung	28
3.3 Bausteine für die Topologieoptimierung mit vorgegebenen Zielspannungszuständen	30
3.3.1 Topologieoptimierung unter Berücksichtigung von Spannungen	30
3.3.2 Topologieoptimierung nachgiebiger Strukturen	32
3.4 Auswahl geeigneter Ansätze und Hypothesen	33
4 Optimierung der Struktur-Nachweisprobe basierend auf evolutionären Algorithmen	35
4.1 Analyse des Optimierungsproblems	35
4.2 Basisbeispiel	41
4.2.1 Ergebnisse der anfänglichen Problemformulierung	42
4.2.2 Modifizierte Problemformulierung	43
4.3 Erweiterte Zielspannungsvorgaben	49

4.4	Verbesserte Strukturrepräsentation für anwendungsnahe Ergebnisse	53
4.4.1	Angepasste Problemformulierung und -analyse	55
4.4.2	Weitere Modifikationen zur Generierung klarer Strukturen	58
4.4.3	Vorgabe mehrerer Zielbereiche und Problemskalierung	65
4.5	Parametereinflüsse	71
4.5.1	Problemparameter	71
4.5.2	Optimierungsparameter	73
5	Gradientenbasierte Optimierung der Struktur-Nachweisprobe	83
5.1	Formulierung des modularen Frameworks zur gradientenbasierten Topologieoptimierung	83
5.1.1	Verwendete Optimierungsalgorithmen	86
5.1.2	Sensitivitätsanalyse klassischer Topologieoptimierungsprobleme	86
5.1.3	Direkte und indirekte Formulierung des Optimierungsproblems für die Struktur-Nachweisprobe	88
5.1.4	Umsetzung des Optimierungsproblems für die Struktur-Nachweisprobe	91
5.2	Optimierungsergebnisse und Parametereinflüsse	93
5.3	Skalierung auf dreidimensionale Lösungen	98
6	Übertragung der Optimierungsergebnisse auf reale Nachweisproben	107
6.1	Geometrieerzeugung	107
6.1.1	Übertragung der Topologielösungen auf höhere Elementauflösungen .	108
6.1.2	Formableitung unter Einhaltung der Nebenbedingungen	112
6.2	Validierung der Probengeometrien mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen	114
6.2.1	Validierungskonzept	114
6.2.2	Prüfung von additiv gefertigten Materialproben	116
6.2.3	Simulation von Materialproben zur Kalibrierung des Materialmodells .	120
6.2.4	Prüfung der additiv gefertigten Struktur-Nachweisproben	123
6.2.5	Ermittlung der Spannungszustände aus den experimentellen Untersuchungen	130
6.2.6	Simulation der Struktur-Nachweisproben	134
6.3	Erzeugung von Struktur-Nachweisproben anhand eines Praxisbeispiels	146
6.3.1	Ableitung eines realen Referenzbauteils: Türverriegelungswelle	146
6.3.2	Schritt 1: Identifikation versagenskritischer Spannungszustände	147

6.3.3	Schritt 2: Erzeugung der Struktur-Nachweisprobe	149
6.3.4	Validierung der Probengeometrie mittels Simulation	151
7	Diskussion der Ergebnisse und Verbesserungsmöglichkeiten	153
7.1	Untersuchte Aspekte zur Erzeugung einer Struktur-Nachweisprobe und Unsicherheiten	154
7.1.1	Schritt 2.1: Leistungsfähigkeit des Optimierungsansatzes	154
7.1.2	Schritte 2.2 und 2.3: Herausforderungen bei der Übertragung auf eine reale Probe	157
7.2	Maßnahmen für eine zuverlässige Anwendung der Struktur-Nachweisprobe .	158
7.2.1	Schritte V und 1: Bauteildefinition und Identifikation versagenskritischer Spannungszustände	158
7.2.2	Schritt N1: Fertigung	160
7.2.3	Schritte N2 und N3: Experimentelle Prüfung und indirekte Qualitätsbewertung	161
7.3	Steigerung der Effizienz der Methodik zur Erzeugung von Struktur-Nachweisproben	162
7.4	Bedeutung im industriellen Umfeld und Ansatzpunkte für zukünftige Entwicklungen	165
8	Zusammenfassung und Ausblick	169
	Literaturverzeichnis	173
	Abbildungsverzeichnis	189
	Tabellenverzeichnis	199