

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele und grundlegende Annahmen	3
1.3 Aufbau	4
2 Stand der Forschung	5
2.1 Begriffsdefinition und -abgrenzung aktiv formveränderlicher Flügel	5
2.2 Aktiv formveränderliche Flügel	5
2.2.1 Motivation und Potential	6
2.2.2 Historie und Konzepte aktiv formveränderlicher Flügel	7
2.3 Optimierungsmethoden aktiv formveränderlicher Flügel	9
2.3.1 Aerodynamische Optimierungsmethoden	10
2.3.2 Strukturelle Optimierungsmethoden	12
2.3.3 Aero-strukturelle Optimierungsmethoden	15
2.4 Einordnung der Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext	17
3 Grundlagen	21
3.1 Flugmechanische und aerodynamische Grundlagen	21
3.2 Flügelprofile	23
3.2.1 Profilgeometrie	24
3.2.2 Profilaerodynamik	25
3.3 Grenzschichttheorie	28
3.4 Zweidimensionale Strömungssimulation	30
3.5 Methode der Finiten Elemente	31
3.5.1 Linear-statische Strukturanalyse	32
3.5.2 Zwei-Knoten Balkenelement <i>beam2</i>	33
3.6 Fluid-Struktur Kopplung	33
3.7 Numerische Optimierung	34
3.7.1 Evolutionäre Algorithmen	36
3.7.2 Optimierungsprogramm <i>GEOps²</i>	38
3.7.3 Konvergenzkriterien für Mehrzieloptimierungen	38
4 Konzept des aktiv formveränderlichen Flügelsegments	41
4.1 Strukturkonzept	41
4.2 Randbedingungen und Ziele	42
4.3 Zugrundeliegende Vereinfachungen infolge zweidimensionaler Betrachtung	42
4.3.1 Aerodynamik	42

4.3.2	Struktur	43
4.4	Bestimmung aerodynamischer Betriebspunkte	44
5	Erweiterung des Finite Elemente Löfers FiPPS²	45
5.1	Anbindung des aerodynamischen Löfers XFOIL	45
5.1.1	Datenaustausch über XfoilWrapper	45
5.1.2	Bestimmung der kritischen MACH-Zahl in XfoilWrapper	47
5.2	Zweidimensionale Fluid-Struktur Kopplung	48
5.2.1	Übertragung der Oberflächendrücke	49
5.2.2	Übertragung der Verschiebungen	51
6	Aerodynamische Optimierung	53
6.1	Parametrische Beschreibung von Flügelprofilen	54
6.1.1	BÉZIER-PARSEC Methode	56
6.1.2	Class-Shape Transformation Methode	56
6.1.3	PODFoil – Profilparametrisierung durch Singularwertzerlegung	59
6.2	Optimierungsablauf	63
6.2.1	Zielgrößen	63
6.2.2	Nebenbedingungen	65
6.2.2.1	Aerodynamische Nebenbedingungen	65
6.2.2.2	Geometrische Nebenbedingung	67
6.2.3	Aerodynamisches Bewertungsmodell	67
6.2.4	Optimierungsparameter	69
6.3	Optimierungsergebnisse	70
6.3.1	Anwendungsfall 1: Generisches Anwendungsbeispiel	70
6.3.1.1	Konvergenz	71
6.3.1.2	PARETO-Fronten	74
6.3.1.3	Ausgewählte Individuen	75
6.3.1.4	Plausibilitätsprüfung mit höherwertigem Strömungslöser	79
6.3.2	Anwendungsfall 2: Reiseflug subsonisches Verkehrsflugzeug	89
6.3.2.1	Konvergenz	89
6.3.2.2	PARETO-Fronten	89
6.3.2.3	Ausgewählte Individuen	90
6.3.2.4	Plausibilitätsprüfung mit höherwertigem Strömungslöser	92
6.4	Wesentliche Ergebnisse	96
7	Aero-strukturelle Optimierung	99
7.1	Parametrische Modellbeschreibung	99
7.1.1	Strukturparametrisierung	99
7.1.1.1	LINDENMAYER-Zellsysteme	100
7.1.1.2	VORONOI-Diagramme	105
7.1.1.3	Bijektive Graphbeschreibung	108
7.1.1.4	Grundlegender Vergleich der Parametrisierungsmethoden	112
7.1.2	Beschreibung der Strukturdicke	114
7.1.3	Aktuatorplatzierung und -modellierung	116
7.1.4	Modellierung des Flügelholms	119

7.2	Umsetzung des Modellgenerators	119
7.3	Modellierungsdetails	121
7.3.1	Strukturmodell	121
7.3.2	Aerodynamisches Modell	122
7.4	Beschreibung des Optimierungsproblems	122
7.4.1	Flugzustände	123
7.4.2	Approximation weiterer Widerstandsanteile	125
7.4.2.1	Approximation des Trimmwiderstands	125
7.4.2.2	Approximation des Wellenwiderstands	128
7.4.3	Zielgrößen	129
7.4.4	Nebenbedingungen	131
7.4.4.1	Aerodynamische Nebenbedingungen	131
7.4.4.2	Geometrische Nebenbedingungen	131
7.4.4.3	Strukturelle Nebenbedingungen	132
7.4.5	Aero-strukturelles Bewertungsmodell	133
8	Anwendungsbeispiel und Effizienzabschätzung	137
8.1	Problemdefinition	137
8.1.1	Referenzflugzeug	137
8.1.2	Missionsprofil	138
8.1.3	Parameter des formveränderlichen Flügelsegments	138
8.1.4	Optimierungsparameter	140
8.2	Aero-strukturelle Optimierung	140
8.2.1	Konvergenz	142
8.2.2	PARETO-Fronten	144
8.2.3	Detailbetrachtungen ausgewählter Individuen	145
8.2.3.1	Strukturlösungen mittels LINDENMAYER-Zellsystemen	146
8.2.3.2	Strukturlösungen mittels VORONOI-Diagrammen	150
8.2.3.3	Strukturlösungen mittels Bijektiver Graphbeschreibung	153
8.2.4	Aerodynamische Analyse	155
8.2.5	Vergleich der Methoden zur Strukturparametrisierung	159
8.2.6	Fazit zu Charakteristika der Strukturlösungen	160
8.3	Effizienzbewertung	161
8.3.1	Modell zur Ermittlung des Treibstoffbedarfs	162
8.3.2	Approximation des Flugzeugesamtwidestands	165
8.3.3	Approximation des Energiebedarfs für aktive Formänderung	167
8.3.4	Ergebnisse der Effizienzbewertung	168
9	Zusammenfassung und Ausblick	175
	Literaturverzeichnis	179
	Abbildungsverzeichnis	203
	Tabellenverzeichnis	213

Anhang	215
A.1 Grundlagen des Zwei-Knoten Balkenelements <i>beam2</i>	215
A.1.1 Elementsteifigkeitsmatrix	215
A.1.2 Thermomechanische Lasten	218
A.1.3 Spannungsberechnung	218
A.2 Ergänzende Details zur Erweiterung des Finite Elemente Lölers <i>FiPPS²</i>	220
A.2.1 Linienlast auf Balkenelement	220
A.2.2 Kontaktformulierung – Knoten zu Balkenelement	221
A.2.3 Berechnung der Gesamtdehnungsenergie	222
A.3 Ergänzungen zur Profilparametrisierung mittels Singulärwertzerlegung <i>PODFoil</i>	224
A.3.1 POD-Moden 7 bis 22	224
A.3.2 Modale Energie	227
A.4 Wertebereiche der Parameter zur Profilparametrisierung	228
A.4.1 BÉZIER-PARSEC BP 3434	228
A.4.2 <i>PODFoil</i>	229
A.5 Vergleichsprofile	230
A.6 Erweiterte Ergebnisdarstellung zu aerodynamischer Optimierung	231
A.6.1 Anwendungsfall 1	231
A.6.1.1 PARETO-Fronten	231
A.6.1.2 RANS-Nachrechnung des Individuums CST10_2	235
A.6.2 Anwendungsfall 2	237
A.6.2.1 Konvergenz	237
A.6.2.2 PARETO-Fronten	239
A.6.2.3 Ausgewählte Individuen	243
A.6.2.4 RANS-Nachrechnung des Individuums <i>PODFoil</i> 10_2	246
A.7 Widerstandspolaren zur Approximation des Trimmwiderstands	248
A.8 Daten des Referenzflugzeugs	252
A.9 Erweiterte Ergebnisdarstellung zu Anwendungsbeispiel und Effizienzabschätzung	253
A.9.1 Aero-strukturelle Optimierung	253
A.9.1.1 PARETO-Fronten	253
A.9.1.2 Individuum LM_1	255
A.9.1.3 Individuum LM_2	256
A.9.1.4 Individuum VD_1	257
A.9.1.5 Individuum VD_2	258
A.9.1.6 Individuum BG_1	259
A.9.1.7 Individuum BG_2	260
A.9.1.8 Widerstandspolaren	261