

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Herausforderungen für zukünftige Hubschrauber . . . . .	1
1.2 Problemstellung . . . . .	2
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	2
1.4 Rahmen dieser Arbeit . . . . .	3
<b>2 Adaptive Hubschrauberrotoren: Stand der Technik &amp; aktuelle Forschungsergebnisse</b>	<b>5</b>
2.1 Eigenschaften moderner Hubschrauber . . . . .	5
2.1.1 Hubschrauberrotor als System in erzwungener Schwingung . . . . .	5
2.1.2 Vibration . . . . .	6
2.1.3 Lärm . . . . .	10
2.1.4 Flugleistungen . . . . .	11
2.1.5 Aufbau eines modernen Hubschrauberrotorblatts aus Faserverbundwerkstoff . . . . .	11
2.2 Aktorikkonzepte für eine fortschrittliche Rotorsteuerung . . . . .	13
2.2.1 Höherharmonische Steuerung - <i>Higher Harmonic Control</i> . . . . .	14
2.2.2 Einzelblattsteuerung - <i>Individual Blade Control</i> . . . . .	15
2.3 Aktive Rotorblätter für die Einzelblattsteuerung . . . . .	20
2.3.1 Hinterkantenklappen . . . . .	20
2.3.2 Aktive Verwindung . . . . .	28
2.3.3 Vergleich zwischen Hinterkantenklappen und aktiver Verwindung	32
2.4 Bewertung des Stands der Technik und Ziel dieser Arbeit . . . . .	37
2.5 Anforderungen an ein adaptives Hubschrauberrotorblatt mit aktiver Hinterkante . . . . .	37
2.5.1 Benötigte Autorität und Bandbreite eines aktiven Rotorblatts	38
2.5.2 Auftretende Lasten am Rotorblatt . . . . .	38
2.5.3 Anforderungen an die dynamische Auslegung . . . . .	39
2.5.4 Anforderungen an die konstruktive Auslegungen . . . . .	39
<b>3 Eigenschaften piezokeramischer Aktoren</b>	<b>41</b>
3.1 Direkter und inverser piezoelektrischer Effekt . . . . .	41
3.2 Blei-Zirkonat-Titanat - PZT . . . . .	42
3.2.1 Kristallstruktur . . . . .	42
3.2.2 Verhalten einer PZT-Keramik im elektrischen Feld . . . . .	44

3.3	Materialgesetz für piezoelektrische Keramiken . . . . .	44
3.3.1	Lineare Theorie der Piezoelektrizität . . . . .	44
3.3.2	Materialgesetz für PZT . . . . .	47
3.3.3	Definition des quasistatischen materialabhängigen Koppelfaktors	50
3.3.4	Typische Materialkonstanten für PZT . . . . .	51
3.4	Bauformen für Piezoaktoren . . . . .	52
3.4.1	Plattenaktoren . . . . .	52
3.4.2	Stapelaktoren . . . . .	53
3.4.3	Piezokeramische Aktoren mit interdigitalen Elektroden . . . . .	55
3.5	Theorie piezoelektrischer Biegeaktoren . . . . .	57
3.5.1	Vereinfachung des piezoelektrischen Materialgesetzes für den ebenen Spannungszustand . . . . .	58
3.5.2	Vereinfachung des piezoelektrischen Materialgesetzes für den einachsigen Spannungszustand . . . . .	58
3.5.3	Piezoelektrischer Biegeaktor als Euler-Bernoulli-Balken mit aktiven Lagen . . . . .	59
3.5.4	Elementen-Matrizen für ein aktives finites Balkenelement . . . . .	61
3.6	FEM-Modellierung eines piezoelektrischen Materials . . . . .	64
3.6.1	Modellierung des Biegeaktors mit der erweiterten Laminattheorie	64
3.6.2	Analogie mit thermischer Dehnung für die FEM-Modellierung	65
4	<b>Die aktive Hinterkante für ein adaptives Rotorblatt – <i>Active Trailing Edge</i></b>	67
4.1	Konzept einer aktiven Hinterkante . . . . .	67
4.1.1	Auswahl der Aktorik für die aktive Hinterkante . . . . .	67
4.1.2	Integration der Aktorik in den Blattquerschnitt . . . . .	68
4.1.3	Radialer Aufbau eines Rotorblatts mit integrierter aktiver Hinterkante . . . . .	69
4.1.4	Vor- und Nachteile einer aktiven Hinterkante . . . . .	71
4.2	Untersuchung eines generischen Rotorblatts mit aktiver Hinterkante . . . . .	71
4.2.1	Übergang von der passiven zur ausgelenkten aktiven Blattfahne	72
4.2.2	Verformung der aktiven Hinterkante unter aerodynamischer Last	73
4.2.3	Mechanische Eigenschaften eines Rotorblatts mit aktiver Hinterkante . . . . .	76
4.2.4	Kritische Lastfälle für die aktive Hinterkante . . . . .	76
4.2.5	Segmentierte Biegeelemente für die aktive Hinterkante . . . . .	78
4.2.6	Eigenschaften für ein flexibles Füllmaterial . . . . .	82
4.2.7	Auslegungskriterien für ein Rotorblatt mit aktiver Hinterkante	83
4.3	Konzeptauswahl für die detaillierte Untersuchung . . . . .	84
5	<b>Theoretische Untersuchung der Wirksamkeit einer aktiven Hinterkante</b>	85
5.1	Modellierung der aktiven Hinterkante . . . . .	85

5.2	Aeroelastisches Modell der aktiven Hinterkante . . . . .	86
5.2.1	Strömungs-Struktur-Kopplung . . . . .	87
5.2.2	Strukturmodell . . . . .	87
5.2.3	Strömungslöser . . . . .	91
5.3	Optimierung der Geometrie des Biegeelements . . . . .	92
5.3.1	Optimierungsmodell für die aktive Hinterkante . . . . .	93
5.3.2	Auswahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus . . . . .	95
5.4	Auswertung der Optimierungsergebnisse . . . . .	96
5.4.1	Pareto-Front . . . . .	96
5.4.2	Empfindlichkeit auf Nebenbedingungen . . . . .	97
5.4.3	Auswahl eines optimierten Designs . . . . .	103
5.5	Eigenschaften der aktiven Hinterkante mit dem optimiertem Design . . . . .	105
5.5.1	Auslenkungen und Dehnungen der aktiven Hinterkante . . . . .	105
5.5.2	Aeroelastische Profilpolaren . . . . .	107
5.5.3	Vergleich der aktiven Hinterkante mit einer Servo-Hinterkan-tenklappe . . . . .	109
5.6	Wirksamkeit einer aktiven Hinterkante . . . . .	113
5.6.1	Lärm- und Leistungsminderung: Analogie zu einer bekannten Servo-Hinterkantenklappe . . . . .	113
5.6.2	Vibrationsminderung an einem Rotor mit aktiver Hinterkante	114
5.7	Vergleich der zusätzlichen Masse mit der ADASYS-Klappe . . . . .	119
6	<b>Auslegung der passiven Struktur des Rotorblatts mit aktiver Hinter- kante</b>	121
7	<b>Auslegung der Biegemodule für die aktive Hinterkante und Entwick- lung eines geeigneten Fertigungsverfahrens</b>	125
7.1	Auslegung der Biegemodule . . . . .	125
7.1.1	Auswahl geeigneter Werkstoffe . . . . .	125
7.1.2	Prinzipieller Aufbau eines Biegemoduls . . . . .	128
7.1.3	Geometrie der Biegemodule . . . . .	130
7.2	Fertigungssprozess für ein Biegemodul mit in GFK eingebetteten Piezoaktoren . . . . .	132
7.2.1	Fertigungssprozess für ein Biegemodul mit LPS-Aktoren . .	134
7.2.2	Fertigungssprozess für ein Biegemodul mit CMTS-Aktoren ..	134
7.2.3	Fertigungssprozess für ein Biegemodul mit COTS-Aktoren ..	136
7.2.4	Vergleich der Fertigungsprozesse . . . . .	136
8	<b>Experimenteller Nachweis der Machbarkeit eines Rotorblatts mit akti- ver Hinterkante</b>	141
8.1	Voruntersuchungen für die Auslegung der aktiven Hinterkante . . . . .	141