

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Herausforderungen für zukünftige Hubschrauber	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
1.4	Rahmen dieser Arbeit	3
2	Adaptive Hubschrauberrotoren: Stand der Technik & aktuelle Forschungsergebnisse	5
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 Faser- verbundwerkstoff	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
3	Eigenschaften piezokeramischer Aktoren	41
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	Die aktive Hinterkante für ein adaptives Rotorblatt – <i>Active Trailing Edge</i>	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 Hin- terkante	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	Theoretische Untersuchung der Wirksamkeit einer aktiven Hinterkante	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-Hinterkantenklappe	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	Auslegung der passiven Struktur des Rotorblatts mit aktiver Hinterkante	121
7	Auslegung der Biegemodule für die aktive Hinterkante und Entwicklung eines geeigneten Fertigungsverfahrens	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	Fertigungsprozess für ein Biegemodul mit in GFK eingebetteten Piezoaktoren	132
7.2.1	Fertigungsprozess für ein Biegemodul mit LPS-Aktoren	134
7.2.2	Fertigungsprozess für ein Biegemodul mit CMTS-Aktoren	134
7.2.3	Fertigungsprozess für ein Biegemodul mit COTS-Aktoren	136
7.2.4	Vergleich der Fertigungsprozesse	136
8	Experimenteller Nachweis der Machbarkeit eines Rotorblatts mit aktiver Hinterkante	141
8.1	Voruntersuchungen für die Auslegung der aktiven Hinterkante	141