

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xv
Vorveröffentlichungen	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziele	2
1.2 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Hubschrauberheckrotor – Drehmomentenausgleich am Hubschrauber	7
2.1.1 Bauweisen von Heckrotoren	8
2.1.2 Hubschrauberlärmquellen und Heckrotorlärm	11
2.2 Schall und Schallausbreitung – Grundlagen	13
2.2.1 Lärm und Lärmbewertung	14
2.2.2 Schallausbreitung – Wellengleichung	14
2.2.3 Aeroakustische Schallquellen	16
2.2.4 Schallausbreitung in zylindrischen und ringförmigen Kanälen	20
2.3 Turbomaschinenlärm	23
2.3.1 Lärmspektrum von Turbomaschinen	23
2.3.2 Lärmgenerierung in Turbomaschinen	24
2.4 Passive Methoden zur Lärmreduktion von axialen Turbomaschinen und Heckro- ren im Speziellen	32
2.4.1 Reduktion der Blattspitzengeschwindigkeit	32
2.4.2 Veränderung des Rotor-Stator-Abstands	33
2.4.3 Pfeilung (<i>Sweep</i>) und Umfangsneigung (<i>Lean</i>)	35
2.4.4 Optimale Wahl der Schaufelzahl	36
2.4.5 Unregelmäßige Schaufelteilung	38
2.4.6 Weitere lärmmindernde Maßnahmen	39
2.5 Überblick über analytische und numerische Studien zu ummantelten Hubschrau- berheckrotoren	40
2.5.1 Modelle basierend auf der Impuls- und/oder der Blattelementtheorie	41
2.5.2 Quasi-3D-Modelle	41
2.5.3 Dreidimensionale numerische Strömungssimulationen	41
2.5.4 Analytische Modelle zur Bestimmung der Schallabstrahlung	45

3 Numerische Modellierung des Heckrotors	47
3.1 Untersuchungsobjekt – Fenestron des H135 (früher EC135)	47
3.2 Berechnungsstrategie	48
3.3 Phasenverschobene Randbedingungen – <i>Phase-Lag</i> -Methode	49
3.4 Aerodynamische Modellierung des Fenestrons	52
3.4.1 Geometrische Vereinfachungen des Fenestrons	53
3.4.2 Rechenetze	53
3.5 Numerisches Verfahren – Strömungslöser TRACE	57
3.5.1 Strömungsgleichungen	58
3.5.2 Turbulenzmodellierung	59
3.5.3 Räumliche Diskretisierung	60
3.5.4 Zeitliche Diskretisierung und Lösung des linearen Gleichungssystems	60
3.5.5 Randbedingungen	61
3.6 Methode zur Berechnung des Schalls im Fernfeld	62
3.6.1 Akustiklöser APSIM	63
3.6.2 Integrale "Formulierung 1A" der Ffowcs-Williams-Hawkings-Gleichung	63
3.6.3 Numerische Einstellungen, Oberflächennetz und Position der Mikrophone	66
4 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen	69
4.1 Vergleichsdaten – Fenestronprüfstand	69
4.2 Aerodynamische Charakterisierung der Originalstufe	70
4.2.1 Globale Leistungsdaten	70
4.2.2 Aerodynamische Betrachtungen	74
4.2.2.1 Schubverteilung	74
4.2.2.2 Profildruckverteilungen	76
4.2.2.3 Umfangsgemittelte radiale Verteilungen	78
4.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Teilstudie	82
4.3 Validierung der Phase-Lag-Simulationen und Aeroakustik der Originalstufe	83
4.3.1 Fenestronleistungsdaten	84
4.3.2 Stufenaerodynamik	87
4.3.2.1 Zeitgemittelte Rotorschubkraftverteilung	88
4.3.2.2 Zeit- und umfangsgemittelte radiale Verteilungen	90
4.3.2.3 Zeitgemittelte Profildruckverteilungen	93
4.3.2.4 "Rekonstruierte" Druck- und Entropieverteilungen	95
4.3.3 Verifikation und Betrachtung der Aeroakustik der Originalstufe	98
4.3.3.1 Vergleiche im akustischen Nahfeld	99
4.3.3.2 Vergleiche im akustischen Fernfeld	106
4.3.4 Gegenüberstellung des numerischen Aufwands	111
4.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Teilstudie	112
4.4 Modifizierte Statorblattgeometrie – 3D Design	114
4.4.1 Geometrische Designrestriktionen und modifizierte Statorgeometrie	114
4.4.2 Differenzen der globalen Fenestronleistungsdaten	116
4.4.3 Änderungen in der Statoraerodynamik	118
4.4.3.1 Radiale Verlagerung des Massenstroms und Strömungswinkel	119
4.4.3.2 Radiale Verlustverteilungen	121
4.4.3.3 Statorblattaerodynamik	125

4.4.4	Gegenüberstellung der Lärmemissionen	128
4.4.4.1	Wechseldruckpegel am Ein- und Austritt des Fenestrons	128
4.4.4.2	Vergleich der Schalldruckpegelwerte im akustischen Fernfeld	131
4.4.4.3	Modale Struktur des Fenestronwechseldruckfelds	135
4.4.4.4	Verteilung der Wechseldruckgrößen auf der Beschauelfung	146
4.4.4.5	Physikalische Ursachen der Schallreduktion	150
4.4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Teilstudie	152
5	Zusammenfassung und Ausblick	155
5.1	Numerische Modellierung	155
5.2	Ergebnisse der Studien	156
5.3	Themen für weiterführende Studien	158
A	Definition der Formelgrößen	161
A.1	Allgemeine Definitionen	161
A.1.1	Leistungsparameter	161
A.1.2	Aerodynamische Parameter	162
A.1.3	Akustische Parameter	162
A.2	Relativer Gütegradfehler	163
A.3	Induzierter Leistung eines Propellers im Standfall	163
A.3.1	Induzierter Leistung eines offenen Propellers im Standfall (Schwebeflug)	165
A.3.2	Induzierter Leistung eines ummantelten Propellers im Standfall (Schwebeflug)	166
B	Fenestron-CFD-Modelle	169
C	Cut-On-Moden und Netzauslegung	171
C.1	Ausbreitungsfähigkeit der Moden und axiale Wellenzahl	171
C.2	Erforderliche axiale Netzauflösung	173
D	Numerische Studie zu den Einstellungen von APSIM	175
E	Fenestron-Statorblattgenerator	177
E.1	Funktionalität des Programms und Designparameter	177
E.2	Programmablauf	178
E.3	Verlauf der Designparameter für den modifizierten Stator	179
E.4	Eingabedatei für die Generierung des modifizierten Stators	180
	Literaturverzeichnis	183
	Abbildungsverzeichnis	197
	Tabellenverzeichnis	201