

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	V I
-------------------------------------	-----

Bezeichnungen und Abkürzungen	XVI
-------------------------------	-----

1 Einleitung	1
1.1 Begründung und Zielsetzung	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.2.1 Vorderkantenwirbel	2
1.2.2 Schütteln (Buffeting)	4
1.2.3 Extrapolation von Modellergebnissen	8
1.2.4 Numerische Untersuchungen	10
1.3 Beitrag dieser Arbeit	12
2 Grundlagen	14
2.1 Theoretische Beschreibung	14
2.1.1 Grundgleichungen	14
2.1.2 Statistische Beschreibung	19
2.1.3 Ähnlichkeit und Kennzahlen	19
2.1.3.1 Wesentliche Einflußgrößen	20
2.1.3.2 Experimentelle Simulation	21
2.2 Strömungsphysik	22
2.2.1 Vorderkantenwirbelsystem	22
2.2.1.1 Ausbildung der Primärwirbel	22
2.2.1.2 Aufplatzvorgang der Primärwirbel	34
2.2.1.3 Ausbildung der Sekundärwirbel	45
2.2.1.4 Strömungsfeld im Nachlauf	47
2.2.1.5 Instationarität	48
2.2.2 Interferierende Wirbelsysteme	49
2.2.3 Topologisch-physikalische Interpretation	52

3	Verwendete Meßverfahren	54
3.1	Strömungssichtbarmachung	54
3.1.1	Laserlichtschnittverfahren	54
3.1.2	Flüssigkristallmeßtechnik	55
3.2	Hitzdrahtmeßtechnik	56
3.2.1	Übersicht	56
3.2.2	Grundgleichungen	58
3.2.3	Sonden und Meßmodus	62
3.2.4	Meßkette	63
3.2.5	Rechnergestützte Kalibrierung und Auswertung	65
3.2.5.1	Eichmethode	65
3.2.5.2	Look-up Table	69
3.2.6	Meßgenauigkeit, Fehlerabschätzung und Fehlerkompensation	72
3.2.6.1	Anforderungen an die Meßgenauigkeit	72
3.2.6.2	Fehlerquellen	75
3.2.6.3	Temperaturkorrektur	76
3.3	Messung instationärer aerodynamischer Drücke	78
3.3.1	Meßmethode und Meßbereich	78
3.3.2	Drucksensoren	79
3.3.3	Meßdatenerfassungssystem	81
4	Versuchsdurchführung und Auswertung	84
4.1	Windkanalmodelle	84
4.1.1	Deltaflügel kleiner Streckung	84
4.1.2	Deltaflügel mäßiger Streckung	84
4.1.3	Delta-Canard-Konfiguration	85
4.2	Versuchsanlagen	87
4.2.1	Windkanäle	87
4.2.2	Einbau der Modelle und Meßsonden	88
4.3	Anwendung der Meßverfahren	90
4.3.1	Spezifikation der Meßparameter	90
4.3.2	Meßumfang	91
4.4	Auswertung	95
4.4.1	Instationäre Geschwindigkeiten	95
4.4.2	Instationäre Oberflächendrücke	96

5	Ergebnisse und Analysen	99
5.1	Übersicht	99
5.2	Starke Vorderkantenwirbel	100
5.2.1	Feldgrößen	100
5.2.1.1	Vergleich mit veröffentlichten Ergebnissen	100
5.2.1.2	Stationäres Geschwindigkeits- und Wirbelstärkefeld	107
5.2.1.3	Turbulenzintensität	122
5.2.1.4	Statistische Analyse	136
5.2.2	Oberflächendrücke	144
5.2.2.1	Vergleich mit veröffentlichten Ergebnissen	144
5.2.2.2	Stationäre Druckverteilung	147
5.2.2.3	Druckschwankungsintensität	153
5.2.2.4	Einfluß der Reynoldszahl	159
5.2.2.5	Spektralverteilung	159
5.2.2.6	Kohärente Strukturen	169
5.2.2.7	Dominierende Frequenz	171
5.2.3	Spiralförmige Instabilität	175
5.2.4	Zusammenfassung	180
5.3	Mäßige Vorderkantenwirbel	182
5.3.1	Feldgrößen	182
5.3.1.1	Stationäres Geschwindigkeits- und Wirbelstärkefeld	182
5.3.1.2	Turbulenzintensität	188
5.3.2	Zusammenfassung	192
5.4	Interferierende Vorderkantenwirbel	194
5.4.1	Strömungssichtbarmachung	194
5.4.2	Feldgrößen	199
5.4.2.1	Stationäres Geschwindigkeits- und Wirbelstärkefeld	199
5.4.2.2	Turbulenzintensität	209
5.4.2.3	Spektrale Leistungsdichte	224
5.4.3	Zusammenfassung	227
5.4.4	Analysen zum Fin-Buffeting	229
5.4.4.1	Charakterisierung des Strömungsfeldes	229
5.4.4.2	Turbulenzintensität und Spektralverteilung	231
5.4.4.3	Skalierung der reduzierten Frequenz	235
5.4.4.4	Kriterien und Richtlinien	240

6	Berechnung und Analyse der am Seitenleitwerk der Delta-Canard-Konfiguration induzierten instationären Drücke auf der Basis gemessener Geschwindigkeitsfluktuationen	242
6.1	Erregerinput des Fin-Buffeting	242
6.1.1	Meßprogramm	242
6.1.2	Laterale Turbulenzintensitätsverteilung	243
6.1.3	Spektrale Leistungsdichte der Seitenwindschwankungen	246
6.2	Verfahren zur Berechnung der instationären Druckverteilung	251
6.2.1	Voraussetzungen	251
6.2.2	Tragflächenverfahren	253
6.2.3	Einführung des lokalen zeitabhängigen Anstellwinkels	255
6.3	Diskussion und Analyse der berechneten Druckschwankungen	259
6.3.1	Schwankungsintensität	259
6.3.2	Spektrale Leistungsdichte der Druck- und Normalkraftschwankungen	263
6.3.3	Dominierende Frequenz	267
6.4	Bewertung und Schlußfolgerungen	270
7	Zusammenfassung und Ausblick	272
	Literaturverzeichnis	277
A	Anhang	291
A.1	Simulationsparameter ausgewählter Referenzen	292
A.2	Statistische Beschreibung	295
A.2.1	Klassifizierung von Zeitreihen	295
A.2.2	Basisfunktionen	297
A.2.3	Verteilungsfunktionen	299
A.2.4	Mittelungszeitraum	314
A.2.5	Statistische Fehler bei der Zeitreihenanalyse	316
A.3	Digitale Hitzdrahtmeßtechnik	319
A.3.1	Basisgrößen	319
A.3.2	Look-up Table-Verfahren	320
A.3.2.1	Mehrdimensionale Taylorreihe	320
A.3.2.2	Spline-Interpolation	326

A.3.2.3	Polynom-Approximation	329
A.4	Tragflächenverfahren bei harmonischer Anstellwinkeländerung	331