Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Christoph Schönleber

Untersuchung von transienten Interferenzeffekten in einem Freistrahl-windkanal für Automobile

IVK

Springer Vieweg

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IFS.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe http://www.springer.com/series/13535

Christoph Schönleber

Untersuchung von transienten Interferenzeffekten in einem Freistrahl-windkanal für Automobile

Springer Vieweg

Christoph Schönleber
IFS, Fakultät 7, Lehrstuhl für Kraftfahrwesen
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2020

D93

ISSN 2567-0042 ISSN 2567-0352 (electronic)
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-32717-0 ISBN 978-3-658-32718-7 (eBook)
https://doi.org/10.1007/978-3-658-32718-7

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2021
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung der Verlage. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Forschungs- und Projekttätigkeit am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart und am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS).

Besonders bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann, einerseits für das mir entgegengebrachte Vertrauen, andererseits für die Unterstützung und Anregungen, mit denen er das Thema vorangetrieben hat. Mit seinem Wissen und seiner Erfahrung im Bereich Fahrzeugaerodynamik und Windkanal war er stets ein kompetenter Gesprächspartner.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner danke ich recht herzlich für die Übernahme des Mitberichts.

Desweiteren danke ich meinen Bereichsleitern, Dr. Timo Kuthada, Dr. Felix Wittmeier und Nils Widdecke, die mich über die Jahre begleitet und stets unterstützt haben.

Auch bei all meinen Kollegen aus dem Bereich Fahrzeugaerodynamik und Thermomanagement möchte ich mich herzlich bedanken. Hervorheben möchte ich dabei Oliver Beland und Benjamin Bock, für ihre Zeit bei abendfüllenden Diskussionen über Windkanal- und Scherschichteffekte.

Darüberhinaus gilt mein Dank allen Mitarbeitern an den Windkanälen, die durch ihre Hilfe und Unterstützung bei zahlreichen Messterminen den Abschluss dieser Arbeit möglich gemacht haben.

Zu guter Letzt danke ich meiner gesamten Familie, ganz besonders meiner Frau Annika, die mich in der intensiven Zeit meiner Forschung immer unterstützt und motiviert hat.

Christoph Schönleber

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V
Abbildungsverzeichnis XI
Tabellenverzeichnis XIX
Formelzeichen XXI
Abkürzungen XXVII
Zusammenfassung XXIX
Abstract XXXIII

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik 3

2.1 Der Automobil-Windkanal 3
2.2 Messtechnik im Windkanal 8
2.3 Windkanal-Interferenzeffekte 12
2.3.1 Mercker-Wiedemann-Verfahren 13
2.3.2 Weitere Verfahren zur Interferenz-Berechnung 24
2.3.3 Korrelations-Messungen 25

3 Theoretische Grundlagen 27

3.1 Strömungsmechanik 27
3.2 Resonanzeffekte im Windkanal 30
3.3 Stationäre und instationäre turbulente Strömungen 33
3.4 Die Scherschicht und ihre Instabilitäten 35
3.4.1 Allgemeine Grundlagen der Scherschicht 36
3.4.2 Kelvin-Helmholtz-Instabilität 38

3.4.3 Wechselwirkung zwischen Wirbeln ... 39
3.4.4 Dreidimensionale Strukturen ... 42
3.4.5 Randbedingungen ... 43
3.4.6 Anregung der Scherschicht ... 44
3.4.7 Der Feedback-Mechanismus ... 44
3.5 Der Freistrahl ... 45
3.5.1 Allgemeine Grundlagen des Freistrahls ... 45
3.5.2 Die dominante Mode ... 48
3.5.3 Anregung des Freistrahls ... 49
3.5.4 Dreidimensionale Effekte ... 53
3.5.5 Weitere Untersuchungen ... 53
3.6 Analyse der Messdaten ... 54

4 Prüfstände und Simulationsumgebung ... 61

4.1 Der Modellwindkanal der Universität Stuttgart ... 61
4.1.1 Messungen am Fahrzeug ... 63
4.1.2 Hakensonde ... 64
4.1.3 Mehrlochsonde ... 65
4.1.4 Particle Image Velocimetry ... 65
4.2 Numerische Strömungssimulation ... 67
4.2.1 Die CFD-Software PowerFLOW von Dassault Système 68
4.2.2 Das Simulationsmodell ... 69

5 Experimentelle und simulative Ergebnisse ... 75

5.1 Experimentelle Untersuchung des leeren Modellwindkanals ... 75
5.1.1 Messungen in der Messstrecke ... 75
5.1.2 Anfangsbedingung der Scherschicht ... 90
5.1.3 Untersuchung der oberen Scherschicht vorne ... 91
5.1.4 Untersuchung der oberen Scherschicht hinten ... 98

5.1.5 Betrachtung der turbulenten Anteile der Strömung 103
5.1.6 Modenzerlegung..... 110
5.1.7 Weitere Betrachtungen..... 120
5.2 Experimentelle Untersuchung des Modellwindkanals mit Fahrzeug..... 122
5.3 CFD-Simulation des generischen Düsenmodells..... 125

6 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse..... 131

6.1 Die Anregung der Instabilität..... 131
6.2 Das alternative Wirbelmodell 132
6.3 Der Einfluss der Messstreckenlänge..... 134

7 Schlussfolgerung und Ausblick 137

Literaturverzeichnis 141
Anhang..... 153

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Neue Freistrahl-Windkanäle der vergangenen 50 Jahre mit Düsenfläche und Messstreckenlänge (ohne Klima-WK) 4

Abbildung 2.2: Windkanal Göttinger (a) und Eiffel- (b) Bauart nach [2] 5

Abbildung 2.3: Verschiedene Arten von Messstrecken in Fahrzeug-Windkanälen [2] 6

Abbildung 2.4: Geometrische Größen einer offenen Messstrecke 7

Abbildung 2.5: Aerodynamisch verursachte Ersatzkräfte und Momente am Fahrzeug (nach [3]) 9

Abbildung 2.6: Geschwindigkeitsbestimmung nach der Düsen- (links) und Plenumsmethode (rechts) 11

Abbildung 2.7: Strahlaufweitung (nach [7]) 14

Abbildung 2.8: Düsenblockierung (nach [7]) 16

Abbildung 2.9: Strahlablenkung ($\alpha_2 > \alpha_1$; nach [7]) 18

Abbildung 2.10: Kollektorblockierung (nach [7]) 19

Abbildung 2.11: Geometrische Bestimmung der Sensitivity Length (nach [9]) 23

Abbildung 3.1: Entwicklung des Formparameters und einer Grenzschicht im laminar-turbulenten Übergangsbereich (nach [28]) 28

Abbildung 3.2: Vereinfachtes Halbringwirbel-Modell nach [2] 31

Abbildung 3.3: Entwicklung einer ebenen Scherschicht 36

Abbildung 3.4: Störung an der Trennfläche zwischen zwei parallelen Massenströmen unterschiedlicher Geschwindigkeit 38

Abbildung 3.5: Wechselwirkung aufeinanderfolgender Wellen in der Scherschicht und Aufrollen der Kelvin-Helmholtz-Wirbel (nach Simulation [40]) 39

Abbildung 3.6: Wirbelverschmelzung in der Scherschicht (schematisch) 40

Abbildung 3.7: Entwicklung der Spektren der Anregefrequenz f_f und deren subharmonischen $f_f/2$ sowie der Impulsverlustdicke δ_1 (Anregung nahe der natürlichen Frequenz f_n nach [43]) 41

Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der sekundären Wirbel in einer ebenen Scherschicht (nach Bernal und Roshko [46]) 42

Abbildung 3.9: Turbulenter, ebener Freistrahl mit Geschwindigkeitsverlauf in der Symmetrielinie (nach [26]) 46

Abbildung 3.10: Höchste Strouhal-Zahl in Abhängigkeit des Abstandes zur Düse im runden, turbulenten Freistrahl mit Durchmesser D nach Mankbadi und Liu [52] 48

Abbildung 3.11: Scherschicht-Moden und Strahl-Mode für runde Freistrahlen (nach [55]) 50

Abbildung 3.12: Geschwindigkeitsfeld einer 5 cm-Düse ohne (oben) und mit (unten) akustische Anregung (nach Wehrmann [57]) 52

Abbildung 3.13: POD-Zeitkoeffizienten $a_1(t)$ und $a_2(t)$ (**a** und **b**), Verlauf des Winkels φt (**c**) und der Frequenz φt (**d**) für kohärente Moden **[1, 2]** und fiktive Messdaten (grau) 59

Abbildung 4.1: Messstrecke im Modellwindkanal der Universität Stuttgart 61

Abbildung 4.2: Delta-Flügel am Düsenaustritt, Luftwiderstand (DrivAer Stufenheck) und Druckschwankungen (leere Messstrecke); durchgezogen/gestrichelt: mit/ohne Delta-Flügel (nach [32]) 62

Abbildung 4.3: Hakensonde zur Messung von Grenzschichten 64

Abbildung 4.4: Schematischer Aufbau des PIV-Systems im Modellwindkanal 66

Abbildung 4.5: Vereinfachtes Simulationsmodell der Düse des Modellwindkanals für CFD-Simulationen 70

Abbildung 4.6: Verfeinerungsregionen des CFD-Düsenmodells 71

Abbildung 4.7: Grenzschichtprofile, Impulsverlustdicke und Formparameter am Düsenaustritt unten und oben aus Simulation und Experiment (U_∞ = 45 m/s, y = 0) ... 72

Abbildung 5.1: Gemessener c_p-Verlauf in der Messstrecke des Modellwindkanals mit und ohne Delta-Flügel bei U_∞ = 50 m/s (z = 150 mm) 76

Abbildung 5.2: Gemessener c_p-Verlauf in der Messstrecke des Modellwindkanals mit und ohne Delta-Flügel bei U_∞ = 45 m/s (z = 150 mm) 77

Abbildung 5.3: Gemessener c_p-Verlauf in der Messstrecke des Modellwindkanals ohne Delta-Flügel (z = 150 mm) nach [32] 78

Abbildung 5.4: Turbulenzintensität in der Messstrecke des Modellwindkanals ohne Delta-Flügel (z = 150 mm) 79

Abbildung 5.5: Turbulenzintensität in x- und y-Richtung in der Messstrecke des Modellwindkanals ohne Delta-Flügel für 45, 50 und 55 m/s (z = 150 mm) 80

Abbildung 5.6: Turbulenzintensität in x- und y-Richtung sowie gesamt in der Messstrecke des Modellwindkanals ohne Delta-Flügel (x = - 575 mm, z = 150 mm) 81

Abbildung 5.7: Verhältnis von Längs- zu Querkomponente der Turbulenz-intensität ohne Delta-Flügel (x = - 575 mm, z = 150 mm) 82

Abbildung 5.8: Fast-Fourier-Transformation der Schwankungen in Längs- und Querrichtung ohne Delta-Flügel (x = - 575 mm, z = 150 mm, df = 0,305 Hz) 83

Abbildung 5.9: Kreuz-Korrelation der Längs- und Querkomponente ohne Delta-Flügel (x = -575 mm, y = +/- 195 mm, z = 150 mm) 85

Abbildung 5.10: Kohärenz der Längs- und Querkomponente ohne Delta-Flügel (x = -575 mm, y = +/- 195 mm, z = 150 mm, df = 0,610 Hz) 86

Abbildung 5.11: Dominante Frequenzen aus der Signalanalyse in der Messstrecke des Modellwindkanals (x = - 575 mm, y = +/- 195 mm, z = 150 mm) 87

Abbildung 5.12: Leistungsdichtespektrum der x-Geschwindigkeit in der Messstrecke (x = - 575 mm, y = +/- 195 mm, z = 150 mm) 89

Abbildung 5.13: Leistungsdichten der vier wichtigsten Kanalmoden (aus **Abbildung 5.12**) 90

Abbildung 5.14: Impulsverlustdicke δ_2 und Formparameter H_{12} am Düsenaustritt und initiale Reynolds-Zahl Re_0 der Scherschicht (x' = y' = 0) 91

Abbildung 5.15: ux im vorderen Bereich der oberen Scherschicht (y' = 0) 92

Abbildung 5.16: Höhe der mittleren Geschwindigkeit h_{Um} in der oberen Scherschicht (Messstrecke vorne; y' = 0; U_∞ = 50 m/s) 93

Abbildung 5.17: Geschwindigkeit u_x/U_∞ auf Höhe der Düsenaustrittskante z' = 0 (Messstrecke vorne; y' = 0; U_∞ = 50 m/s) 94

Abbildung 5.18: Wirbeldicke δ_ω in der oberen Scherschicht (Messstrecke vorne; y' = 0; U_∞ = 50 m/s) 95

Abbildung 5.19: Impulsverlustdicke δ_2 der oberen Scherschicht (Messstrecke vorne; y' = 0; U_∞ = 50 m/s) 96

Abbildung 5.20: Breite B der oberen Scherschicht (Messstrecke vorne; y' = 0; U_∞ = 50 m/s) 97

Abbildung 5.21: Öffnungswinkel der oberen Scherschicht γ_S (Messstrecke vorne; y' = 0; U_∞ = 50 m/s) 97

Abbildung 5.22: ux im hinteren Bereich der oberen Scherschicht (y' = 0) 99

Abbildung 5.23: Entwicklung der Wirbeldicke δ_ω der oberen Scherschicht (Messstrecke hinten; y' = 0; links: Standard, rechts: keine Delta-Flügel) 100

Abbildung 5.24: Höhe der mittleren Geschwindigkeit h_{Um} in der oberen Scherschicht (Messstrecke hinten; y' = 0; links: Standard, rechts: keine Delta-Flügel) 101

Abbildung 5.25: Geschwindigkeit u_x/U_∞ auf Höhe z' = 0 (Messstrecke hinten; y' = 0; links: Standard, rechts: keine Delta-Flügel) 102

Abbildung 5.26: Öffnungswinkel der oberen Scherschicht γ_S (Messstrecke hinten; y' = 0; links: Standard, rechts: keine Delta-Flügel) 102

Abbildung 5.27: Profile der turbulenten kinetischen Energie $k/U_\infty{}^2$ im hinteren Bereich der Messstrecke 104

Abbildung 5.28: Profile der Reynolds-Spannung $u'2/U\infty2$ im hinteren Bereich der Messstrecke 105

Abbildung 5.29: Profile der Reynolds-Spannung $w'2/U\infty2$ im hinteren Bereich der Messstrecke 107

Abbildung 5.30: Profile der Reynolds-Spannung $v'2/U\infty2$ im hinteren Bereich der Messstrecke 108

Abbildung 5.31: Profile der Reynolds-Spannung $u'w'/U\infty2$ im hinteren Bereich der Messstrecke 109

Abbildung 5.32: Energien der ersten POD-Moden der hinteren Messfelder (vorne: x' = 1200…1600 mm, hinten: x' = 1700…2100 mm) 111

Abbildung 5.33: x-, y-, z- sowie Gesamtgeschwindigkeit der ersten POD-Mode (45 m/s, keine Delta-Flügel, Mitte der Messstrecke) 112

Abbildung 5.34: Vergleich der Absolutgeschwindigkeit U/U_∞ der ersten POD-Mode in der Mitte der Messstrecke für verschiedene Geschwindigkeiten und Konfigurationen 113

Abbildung 5.35: Geschwindigkeitsfelder u_y/U_∞ der 3. POD-Mode im hinteren Teil der Messstrecke 114

Abbildung 5.36: Geschwindigkeitsfelder u_y/U_∞ der 4. POD-Mode im hinteren Teil der Messstrecke 115

Abbildung 5.37: Phasenwinkel φ und Kreisfrequenz φ für die Mode **[1,2]** für 45 m/s ohne Delta-Flügel..... 116

Abbildung 5.38: Leistungsdichtespektrum der x-Geschwindigkeit in der Messstrecke (x' = 1,0 D_h, y' = 0, z' = -0,5 h_D) und mögliche kohärente Frequenzen (45 m/s ohne Delta-Flügel)..... 117

Abbildung 5.39: Rekonstruktion einer Periode aus den POD-Moden **[1,2]** (45 m/s ohne Delta-Flügel, T = 54,75 ms) 118

Abbildung 5.40: u_z-Komponente der POD-Moden **[1,2,3,4]** in der horizontalen Ebene (45 m/s ohne Delta-Flügel, z' = -50 mm)..... 121

Abbildung 5.41: Momentaufnahme der Absolut- und Vertikalgeschwindigkeit in der horizontalen Ebene (45 m/s ohne Delta-Flügel, z' = -50 mm)..... 122

Abbildung 5.42: Gemessener und korrigierter Luftwiderstand und dessen Standardabweichung (DrivAer Stufenheck im Modellwindkanal mit und ohne Delta-Flügel nach [66])..... 124

Abbildung 5.43: Vorder- und Hinterachsauftrieb des DrivAer Stufenheck im MWK mit und ohne Delta-Flügel 125

Abbildung 5.44: Spektrum der x-Geschwindigkeit in der Messstrecke (x' = 1,0 D_h, y' = 0, z' = -0,5 h_D) ohne Anregung bei U_∞ = 45 m/s (CFD-Simulation) 126

Abbildung 5.45: Druckschwankungen in der Messstrecke (x' = 1,0 D_h, y' = 0, z' = -0,5 h_D) für verschiedene Anregungsfrequenzen f_f bei U_∞ = 45 m/s (CFD-Simulation)..... 127

Abbildung 5.46: Impulsverlustdicke der Scherschicht bei x' = 1,0 D_h im Simulationsmodell für verschiedene Anregungsfrequenzen f_f bei U_∞ = 45 m/s..... 128

Abbildung 5.47: Betrag der Wirbelstärke um die y-Achse in der Mittelebene der oberen Scherschicht für verschiedene Frequenzen f_f 129

Abbildung 6.1: Wirbelmodell für Pumpen (links) und Flattern (rechts) 133

Abbildung A.1: Reynolds-Spannung $u'v'/U\infty 2$ im hinteren Bereich... 153

Abbildung A.2: Reynolds-Spannung $v'w'/U\infty 2$ im hinteren Bereich.. 154

Abbildung A.3: Turbulente kinetische Energie im vorderen Bereich.... 155

Abbildung A.4: Reynolds-Spannung $u'2/U\infty 2$ im vorderen Bereich... 155

Abbildung A.5: Reynolds-Spannung $v'2/U\infty 2$ im vorderen Bereich... 156

Abbildung A.6: Reynolds-Spannung $w'2/U\infty 2$ im vorderen Bereich.. 156

Abbildung A.7: Reynolds-Spannung $u'v'/U\infty 2$ im vorderen Bereich . 157

Abbildung A.8: Reynolds-Spannung $u'w'/U\infty 2$ im vorderen Bereich 157

Abbildung A.9: Reynolds-Spannung $v'w'/U\infty 2$ im vorderen Bereich 158

Abbildung A.10: Spektrum des Drucks in der Messstrecke des Simulations-modells mit f_f = 9,2 Hz bei U_∞ = 45 m/s $(p = 0{,}1 \cdot q)$ 159

Abbildung A.11: Spektrum des Drucks in der Messstrecke des Simulations-modells mit f_f = 17,7 Hz bei U_∞ = 45 m/s $(p = 0{,}1 \cdot q)$ 159

Abbildung A.12: Spektrum des Drucks in der Messstrecke des Simulations-modells mit f_f = 22,0 Hz bei U_∞ = 45 m/s $(p = 0{,}1 \cdot q)$ 160

Abbildung A.13: Spektrum des Drucks in der Messstrecke des Simulations-modells mit f_f = 22,0 Hz bei U_∞ = 45 m/s $(p = 0{,}02 \cdot q)$ 160

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Informationen zum CFD-Düsenmodell des Modellwindkanals 71

Tabelle 5.1: Weitere Auswertung aus der POD-Rekonstruktion 119

Formelzeichen

a	1/m	Wellenlänge
a_i	-	Zeitkoeffizient
A_D	m²	Düsenfläche
A_D^*	m²	reduzierteä Düsenfläche durch Strahlablenkung
A_K	m²	Kollektorfläche
A_M	m²	Stirnfläche
A_{sep}	m²	Ablösefläche
b_D	m	Breite der Düse
B	m	Scherschichtdicke
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_A	-	Gesamtauftriebsbeiwert
$c_{A,h}$	-	Hinterachsauftriebsbeiwert
$c_{A,v}$	-	Vorderachsauftriebsbeiwert
c_L	-	Rollmomentenbeiwert
c_M	-	Nickmomentenbeiwert
c_N	-	Giermomentenbeiwert
c_p	-	Druckbeiwert
c_S	-	Seitenkraftbeiwert
c_W	-	Luftwiderstandsbeiwert
$\Delta c_{W,HB}$	-	Änderung des Luftwiderstandsbeiwerts aufgrund Druckgradient

$c_{W,korr}$	-	korrigierter Luftwiderstandsbeiwert
$c_{W,unkorr}$	-	unkorrigierter Luftwiderstandsbeiwert
D	m	Durchmesser
D_D	m	hydraulischer Düsendurchmesser
D_h	m	hydraulischer Düsendurchmesser der Duplexdüse
D_K	m	hydraulischer Kollektordurchmesser
E_{TKE}^m	-	Anteil der Mode m an der turbulenten kinetischen Energie
f_E	Hz	Frequenz der Edgetone-Rückkopplung
f_f	Hz	Anregefrequenz
f_n	Hz	natürliche Frequenz
f_{nw}	-	kontinuierliche Nachlauffunktion
f_{Pl}	Hz	Plenumseigenfrequenz
f_R	Hz	Eigenfrequenz der Luftführung
f_W	Hz	Wirbelfrequenz
F_A	N	Auftriebskraft
F_S	N	Seitenkraft
F_W	N	Luftwiderstandskraft
G	-	Glauertfaktor
G_{ii}	-	Autoleistungsspektrum
G_{ij}	-	Kreuzleistungsspektrum
h_D	m	Höhe der Düse
h_{Um}	m	Höhe der mittleren Geschwindigkeit
H_{12}	-	Formparameter der Grenzschicht