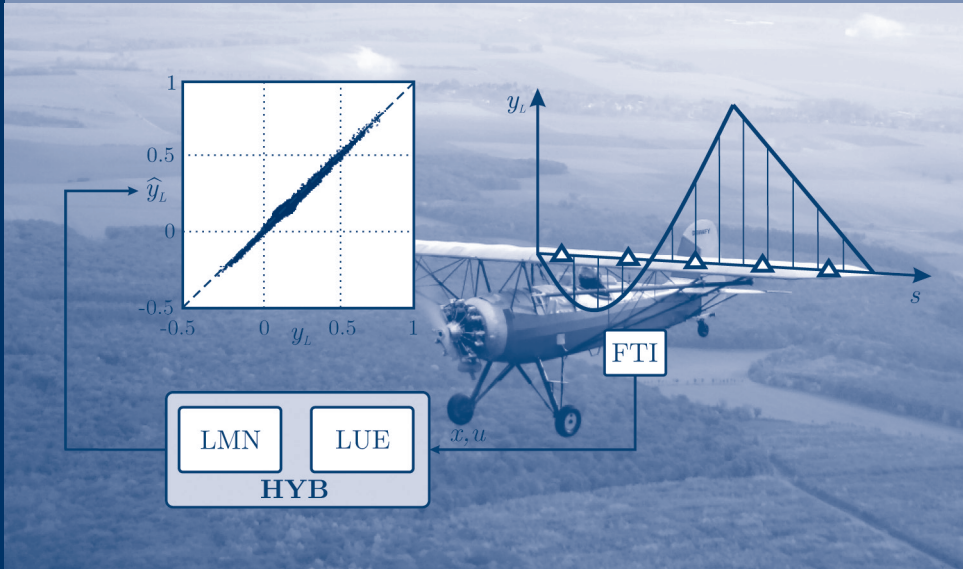


Mike Montel
Berlin

Hybride Beobachter-Methode zur Strukturlastüberwachung und deren Validierung mit Flugversuchsdaten



03-2018

**Hybride Beobachter-Methode
zur Strukturlastüberwachung
und deren Validierung mit Flugversuchsdaten**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing.
Mike Montel

aus Berlin

2018

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke
Institut für Flugzeug-Systemtechnik
Technische Universität Hamburg

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Robert Luckner
Institut für Luft- und Raumfahrt
Fachgebiet Flugmechanik, Flugregelung und Aeroelastizität
Technische Universität Berlin

Tag der münd-
lichen Prüfung: 04. Mai 2018

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 3/2018

Mike Montel

**Hybride Beobachter-Methode zur
Strukturlastüberwachung und deren Validierung
mit Flugversuchsdaten**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6354-7

ISSN 1861-5279

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg im Rahmen der in den Luftfahrtforschungsprogrammen IV und V geförderten Projekte FTEG, ProWings und ATLAS2Hybrid.

Ganz besonders möchte ich meinem Doktorvater und Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke für das entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung bedanken. Die Schaffung eines hervorragenden Forschungsumfeldes und die gewährten wissenschaftlichen Freiräume haben diese Arbeit möglich gemacht. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Luckner für die Unterstützung und freundliche Bereitschaft das Zweitgutachten zu verfassen.

Stellvertretend für alle Partner in den oben genannten Projekten bedanke ich mich bei Martin Besch für zahlreiche wissenschaftliche Gespräche und Diskussionen und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Achim Merklinger für die Durchführung der Flugversuche und die offene und konstruktive Zusammenarbeit.

Ich danke Jan Haar und Florian von Appen für die Schaffung der inhaltlichen Grundlage dieser Arbeit sowie meinen ehemaligen Studenten Fabian Hartleib, Matthias Ram, Michel Dau und mittlerweile guten Freund und Kollegen Tim Schlottbohm, die durch ihre Arbeiten wichtige Beiträge für die Erstellung dieser Dissertation geleistet haben.

Die Zeit am Institut wird mir immer als besonders in Erinnerung bleiben, insbesondere durch die einzigartigen Kollegen, das freundschaftliche Miteinander und die vielen gemeinsamen Aktivitäten. Dafür möchte ich mich sehr herzlich bei allen Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen, die mich in meiner Zeit am Institut begleitet haben, bedanken. Stellvertretend möchte ich dazu an dieser Stelle Matthias Krings, Tobias Kreitz, Sergej Jäger, Felix Mardt, Stefan Benischke und die ehemaligen Kollegen aus Raum 2016 erwähnen.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meiner gesamten Familie, insbesondere meinen Eltern, für die Ermutigung und uneingeschränkte Unterstützung. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Allen voran danke ich meiner lieben Frau Friederike und meiner wundervollen Tochter Amelie für den Rückhalt und das Verständnis. Euch widme ich diese Arbeit.

Hamburg, im November 2018

Mike Montel

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Nomenklatur	xvii
Formelzeichen	xvii
Indizes	xxii
Abkürzungen	xxv
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik	3
1.1.1 Lastenmessung	4
1.1.2 Lastenberechnung	6
1.1.3 Zusammenfassung	11
1.2 Motivation und Gliederung der Arbeit	11
2 Beobachter-Methoden zur Strukturlastüberwachung	15
2.1 Grundlagen der Lastenberechnung	15
2.2 Vorstellung ausgewählter Lastenbeobachter-Methoden	18
2.2.1 Handbuch-Methode	19
2.2.2 Modifiziertes Designmodell	20
2.2.3 Luenberger-Beobachter	24
2.2.4 Lokalmodellnetze	26
2.3 Bewertungskriterien	29
3 Versuchsflugzeug UW-9 SPRINT	33
3.1 Messausrüstung	34
3.1.1 Sensorausstattung	35
3.1.2 Messanlage	39
3.1.3 Kalibrierung	40
3.1.4 Messdatenprozessierung	50

3.1.5	Messrauschen	52
3.2	Flugversuche	53
3.2.1	Manöverbeschreibung	54
3.2.2	Versuchsdurchführung	59
4	Systemidentifikation und Lastenmodellierung	61
4.1	Definition von Koordinatensystemen	61
4.2	Herleitung der Modellstruktur	65
4.2.1	Bewegungsgleichungen	65
4.2.2	Aerodynamikmodell	67
4.2.3	Antriebsmodell	71
4.2.4	Windstörungen	75
4.2.5	Strukturlasten	80
4.3	Parameteridentifikation	82
4.3.1	Ausgangsfehler-Methode	83
4.3.2	Masseparameter	88
4.3.3	Aerodynamische Parameter	92
4.3.4	Antriebsparameter	104
4.4	Validierung des Streckenmodells	109
5	Entwurf und Validierung der Lastenbeobachter-Methoden	115
5.1	Simulations- und Flugversuchsdaten	115
5.2	Handbuch-Methode	118
5.2.1	Entwurf und Bewertung mit Simulationsdaten	119
5.2.2	Entwurf und Bewertung mit Flugversuchsdaten	121
5.2.3	Fazit zur Handbuch-Methode	128
5.3	Modifiziertes Designmodell	130
5.3.1	Bewertung mit Simulationsdaten	130
5.3.2	Bewertung mit Flugversuchsdaten	132
5.3.3	Fazit zum modifizierten Designmodell	136
5.4	Luenberger-Beobachter	138
5.4.1	Entwurf und Bewertung mit Simulationsdaten	139
5.4.2	Bewertung mit Flugversuchsdaten	145
5.4.3	Fazit zum Luenberger-Beobachter	150
5.5	Lokalmodellnetze	151
5.5.1	Entwurf und Bewertung mit Simulationsdaten	153

5.5.2	Entwurf und Bewertung mit Flugversuchsdaten	157
5.5.3	Fazit zur Lokalmellnetz-Methode	165
5.6	Vergleich der Methoden und Schlussfolgerung	166
6	Entwicklung einer hybriden Beobachter-Methode	169
6.1	Hybride Modellstruktur	169
6.2	Entwurf des hybriden Beobachters	171
6.3	Bewertung mit Flugversuchsdaten	174
6.4	Fazit zur hybriden Beobachter-Methode	179
7	Zusammenfassung und Ausblick	183
Anhang		189
A	Ergänzungen zur Validierung der Handbuch-Methode	189
B	Ergänzungen zur Validierung des mod. Designmodells	191
C	Ergänzungen zur Validierung des Luenberger-Beobachters	193
D	Ergänzungen zur Validierung der LMN-Methode	195
E	Ergänzungen zur Validierung des hybriden Beobachters	197
Literaturverzeichnis		199

Abbildungsverzeichnis

1.1	Klassifizierung ausgewählter Methoden zur Strukturlastüberwachung	4
1.2	Prinzipielle Funktionsweise eines Lastenbeobachters	8
2.1	Typische Bemessungslastfälle für Strukturkomponenten	15
2.2	Beispielhafter Verlauf von Schnittlasten an einer Tragfläche	16
2.3	Struktur des Designmodells	20
2.4	Struktur des modifizierten Designmodells	23
2.5	Struktur des Luenberger-Beobachters	25
2.6	Struktur des LMN-Lastenbeobachters	27
2.7	Korrelationsdiagramm zur Bewertung einer Lastensimulation	29
3.1	Versuchsflugzeug UW-9 SPRINT	33
3.2	Messgrößen und deren Messpositionen am Flugzeug	35
3.3	Positionen und Arten der Dehnungsmessung	37
3.4	Architektur der Messanlage	39
3.5	Prozess der Messgrößenaufnahme	40
3.6	Positionen der Lastausgabestationen am Tragflügel	41
3.7	Theoretischer Biegemomentenverlauf am Holm der rechten Tragfläche	42
3.8	Exemplarisches Kalibrierungsergebnis der Biegemomentenmessung	43
3.9	Biegemomentenmessung an der rechten Tragfläche im Horizontalflug	44
3.10	Biegemomentenverlauf einer freitragenden Tragfläche	45
3.11	Gemessene Biegemomente und rekonstruierte Querkräfte	46
3.12	Ermittlung des theoretischen Torsionsmoments am Flügel	47
3.13	Exemplarisches Kalibrierungsergebnis der Torsionsmomentenmessung	48
3.14	Positionen der Lastausgabestationen am Leitwerk	49
3.15	Messdatenprozessierung	51
3.16	Höhenrudersignal im Anstellwinkelschwingungsmanöver	55
3.17	Höhenrudersignal im Phygoidmanöver	56
3.18	Höhenrudersignal im Pushover-Pullup-Manöver	56
3.19	Seitenrudersignal im Taumelschwingungsmanöver	57

3.20	Querrudersignal im Rollmanöver	57
3.21	Quer- und Höhenrudersignal im High-G-Roll-Manöver	58
4.1	Geodätisches und flugzeugfestes Koordinatensystem	62
4.2	Aerodynamisches und experimentelles Koordinatensystem	63
4.3	Komponenten-Koordinatensysteme am Flügel	64
4.4	Komponenten-Koordinatensysteme am Leitwerk	64
4.5	Referenzpunkt-Koordinatensystem	64
4.6	Modellstruktur des Streckenmodells	65
4.7	Panel-Aerodynamikmodell und Massepunktverteilung	70
4.8	Verknüpfung des Panel- und 1-Punkt-Aerodynamikmodells	71
4.9	Aufbau des Antriebsmodells	72
4.10	Geometrie des Antriebssystems	72
4.11	Stehendes, sinusförmiges Windfeld	76
4.12	Approximation einer diskreten Böe durch eine (1-cos)-Funktion	78
4.13	Positionen der Windeingänge am SPRINT	79
4.14	Berechnung von Schnittlasten an der Flügelstruktur	80
4.15	Schematische Darstellung der Ausgangsfehler-Methode	83
4.16	Freischnitt des Flugzeuges zur Bestimmung der Schwerpunktposition	88
4.17	Aufbau des Pendelversuchs	90
4.18	Zustandsgrößen des Streckenmodells	92
4.19	Ergebnis der Aerodynamikidentifikation: ASM DP0548	95
4.20	Ergebnis der Aerodynamikidentifikation: PHM DP0557	96
4.21	Ergebnis der Aerodynamikidentifikation: RLM DP0776	100
4.22	Ergebnis der Aerodynamikidentifikation: TSM DP0828	101
4.23	Ergebnis der Identifikation von Kopplungsparametern: TSM DP0661	103
4.24	Ergebnis der Bruttoschub-Identifikation	105
4.25	Ergebnis der Identifikation des Interferenzmodells: ASM DP1536	107
4.26	Ergebnis der Identifikation des Interferenzmodells: TSM DP1487	108
4.27	Validierung der Aerodynamik: Verzögerungsmanöver DP0668	110
4.28	Validierung der Aerodynamik: Anstellwinkelmanöver DP0713	111
4.29	Validierung des Gesamtmodells: Anstellwinkelmanöver DP1538	113
4.30	Validierung des Gesamtmodells: Taumelschwingungsmanöver DP1519	114
5.1	Validierung der Handbuch-Methode mit Simulationsdaten	121
5.2	Validierung der Handbuch-Methode mit Flugversuchsdaten (LB)	124

5.3	Validierung der Handbuch-Methode (komplette Flugdatenbasis)	126
5.4	Validierung der Handbuch-Methode bezüglich Böenlasten	127
5.5	Validierung der Handbuch-Methode: PPM DP3218	129
5.6	Validierung der Handbuch-Methode: STF DP3201	129
5.7	Validierung des mod. Designmodells mit Simulationsdaten	131
5.8	Validierung des mod. Designmodells (komplette Flugdatenbasis)	133
5.9	Validierung des mod. Designmodells bezüglich Böenlasten	135
5.10	Validierung des mod. Designmodells: PPM DP3218	137
5.11	Validierung des mod. Designmodells: STF DP3201	137
5.12	Auslegung des Luenberger-Beobachters	140
5.13	Identifikation der Beobachterparameter (Lue): Windschätzung	142
5.14	Validierung des Luenberger-Beobachters mit Simulationsdaten	143
5.15	Validierung des Luenberger-Beobachters (Simulationsdaten, Zeitbereich): Erhöhung des Nullauftriebsbeiwertes um +25%	144
5.16	Validierung des Luenberger-Beobachters (komplette Flugdatenbasis)	146
5.17	Validierung des Luenberger-Beobachters bezüglich Böenlasten	148
5.18	Validierung des Luenberger-Beobachters: PPM DP3218	149
5.19	Validierung des Luenberger-Beobachters: STF DP3201	149
5.20	Ergebnis der Lokalmittelnetz-Identifikation mit Simulationsdaten	154
5.21	Validierung der Lokalmittelnetz-Methode mit Simulationsdaten	155
5.22	Extrapolationsverhalten der Lokalmittelnetz-Methode	156
5.23	Gemessenes Biegemoment über gemessenes Lastvielfaches	158
5.24	Ergebnis der LMN-Identifikation mit Flugdaten (Modellbaum, LS ₆)	159
5.25	Ergebnis der LMN-Identifikation mit Flugdaten (Modellbaum, LS ₁₀)	159
5.26	Validierung der LMN-Methode (komplette Flugdatenbasis)	161
5.27	Validierung der LMN-Methode bezüglich Böenlasten	163
5.28	Validierung der LMN-Methode: PPM DP3218	164
5.29	Validierung der LMN-Methode: STF DP3201	164
6.1	Modellstruktur des hybriden Beobachters	170
6.2	Abhängigkeiten des Korrektursignals $\Delta \widehat{M}_x^{LS_{10}}$	172
6.3	Ergebnis der Lokalmittelnetz-Identifikation für das Korrekturmodell im hybriden Lastenbeobachter: Darstellung der Modellbäume	173
6.4	Validierung des hyb. Beobachters (komplette Flugdatenbasis)	175
6.5	Validierung des hyb. Beobachters bezüglich Böenlasten	176
6.6	Validierung des hyb. Beobachters: PPM DP3218	178

6.7	Validierung des hyb. Beobachters: STF DP3201	178
6.8	Validierung des hyb. Beobachters: Flügeltorsionsmoment	180
6.9	Validierung des hyb. Beobachters: Querkraft, Biegemoment und Torsi- onsmoment am Seitenleitwerk	180
A.1	Validierung der Handbuch-Methode: High-G-Roll-Manöver DP3231 . .	189
A.2	Validierung der Handbuch-Methode: TSM DP3114	189
B.1	Validierung des mod. Designmodells: HRM DP3231	191
B.2	Validierung des mod. Designmodells: TSM DP3114	191
B.3	Validierung des mod. Designmodells (Laststationen LS ₇ , LS ₈ , LS ₉) . .	192
C.1	Validierung des Luenberger-Beobachters: HRM DP3231	193
C.2	Validierung des Luenberger-Beobachters: TSM DP3114	193
C.3	Validierung des Luenberger-Beobachters (Laststationen LS ₇ , LS ₈ , LS ₉)	194
D.1	Validierung der LMN-Methode: HRM DP3231	195
D.2	Validierung der LMN-Methode: TSM DP3114	195
D.3	Validierung der LMN-Methode (Laststationen LS ₇ , LS ₈ , LS ₉)	196
E.1	Validierung des hyb. Beobachters: HRM DP3231	197
E.2	Validierung des hyb. Beobachters: TSM DP3114	197
E.3	Validierung des hyb. Beobachters (Laststationen LS ₇ , LS ₈ , LS ₉)	198

Tabellenverzeichnis

1.1	Allgemeine Anforderungen an eine effektive Lastenüberwachung	12
3.1	Kenngrößen des Versuchsflugzeuges UW-9 SPRINT	34
3.2	Messbereiche und Genauigkeiten der Sensoren	38
3.3	Mittlere relative Kalibrierungsfehler der Biegemomentenmessungen . .	43
3.4	Mittlere relative Kalibrierungsfehler der Torsionsmomentenmessung .	48
3.5	Flügelaststationen und jeweils messbare Strukturlastkomponenten . .	49
3.6	Messbare Strukturlastkomponenten an den Laststationen des Leitwerks	50
3.7	Mittlere relative Kalibrierungsfehler an den Laststationen des Leitwerks	50
3.8	Genauigkeiten der Messsignale nach Fehlerfortpflanzung	52
3.9	Standardabweichung der Messsignale im stat. Horizontalflug	53
3.10	Manövertypen und deren Anzahl in der Messdatenbasis	59
4.1	Kategorisierung der Turbulenzintensität für den UW-9 SPRINT	77
4.2	Zusammenfassung der Parameter des Streckenmodells	86
4.3	Unsicherheiten der Schwerpunktage	89
4.4	Standardabweichungen der Hauptträgheitsmomente	91
4.5	Identifizierte Aerodynamikparameter der Längsbewegung	94
4.6	Schätzfehler und Standardabweichungen für DP0548 und DP0557 . . .	97
4.7	Identifizierte Aerodynamikparameter der Seitenbewegung	99
4.8	Schätzfehler und Standardabweichungen für DP0776 und DP0828 . . .	102
4.9	Identifizierte aerodynamische Kopplungsparameter	103
4.10	Mittlerer Fehler und Standardabweichung der Bruttoschubsimulation .	104
4.11	Identifizierte Parameter des Interferenzmodells	106
4.12	Schätzfehler und Standardabweichungen für DP1536 und DP1487 . . .	107
5.1	Manövertypen des Simulationsdatensets	116
5.2	Identifikationsmanöver des Simulationsdatensets	117
5.3	Identifikationsmanöver des Versuchsdatensets	117
5.4	Parameter der Hbk-Methode (Simulation)	119

5.5	Bewertungskriterien der Hbk-Methode (Identifikation, Simulation) . . .	119
5.6	Bewertungskriterien der Hbk-Methode (Validierung, Simulation) . . .	120
5.7	Parameter der Hbk-Methode (Flugversuchsdaten)	122
5.8	Bewertungskriterien der Hbk-Methode (Identifikation, Flugdaten, LB)	122
5.9	Bewertungskriterien der Hbk-Methode (Validierung, Flugdaten, LB) .	123
5.10	Bewertungskriterien Hbk-Methode (Validierung, Flugdaten, LB+SB) .	125
5.11	Bewertungskriterien Hbk-Methode (Val., Flugdaten, Turbulenz)	127
5.12	Bewertungskriterien des mod. Designmodells zur Untersuchung des Einflusses von Messrauschen (Validierung, Simulation)	132
5.13	Bewertungskriterien des mod. Designmodells unter Erhöhung von C_{A0} um +25 % (Validierung, Simulation)	132
5.14	Bewertungskriterien mod. Designmodell (Val., Flugdaten, LB+SB) . .	134
5.15	Bewertungskriterien mod. Designmodells (Val., Flugdaten, Turbulenz)	135
5.16	Identifikationsergebnis der Beobachterparameter (Lue)	142
5.17	Bewertungskriterien des Luenberger-Beobachters zur Untersuchung des Einflusses von Messrauschen (Validierung, Simulation)	142
5.18	Bewertungskriterien des Luenberger-Beobachters unter Erhöhung von C_{A0} um +25 % (Validierung, Simulation)	143
5.19	Bewertungskrit. Luenberger-Beobachter (Val., Flugdaten, LB+SB) . .	145
5.20	Bewertungskrit. Luenberger-Beobachter (Val., Flugdaten, Turbulenz) .	147
5.21	Bewertungskrit. LMN-Methode (Identifikation, Simulation, LB)	154
5.22	Bewertungskrit. LMN-Methode (Val., Sim., LB, ohne Messrauschen) .	155
5.23	Bewertungskrit. LMN-Methode (Val., Sim., LB, mit Messrauschen) . .	155
5.24	Bewertungskrit. LMN-Methode bezüglich Extrapolation	157
5.25	Bewertungskrit. LMN-Methode (Identifikation, Flugdaten, LB+SB) .	160
5.26	Bewertungskrit. LMN-Methode (Validierung, Flugdaten, LB+SB) . .	160
5.27	Bewertungskrit. LMN-Methode (Val., Flugdaten, Turbulenz)	162
5.28	Vergleich der Lastenbeobachter-Methoden	167
6.1	Bewertungskrit. hyb. Beobachter (Identifikation, Flugdaten, LB+SB) .	174
6.2	Bewertungskrit. hyb. Beobachter (Validierung, Flugdaten, LB+SB) . .	174
6.3	Bewertungskrit. hyb. Beobachter (Validierung, Flugdaten, Turbulenz)	177
6.4	Vergleich der Lastenbeobachter-Methoden (inkl. hyb. Beobachter) . .	181

Nomenklatur

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	N	Auftriebskraft
a, b, c	m	Längenparameter
b	m	Flügelspannweite
C_Q, C_W, C_A	–	Querkraft-, Widerstands-, Auftriebsbeiwert
C_l, C_m, C_n	–	Roll-, Nick-, Giermomentenbeiwert
C_{X0}	–	Nullbeiwert mit $X \in [A, W, Q, l, m, n]$
C_{Xw_i}	–	Aerodynamische Derivative mit $X \in [A, W, Q, l, m, n]$ und Einflussgrößen w_i
\underline{C}	–	Ausgangsmatrix
d	Ns/m	Dämpfungskonstante
d	m	Durchmesser
F	N	Kraft
F	–	Übertragungsfunktion
\widehat{F}^S	N	Vektor der Antriebslasten (Simulation)
\underline{f}	–	Funktionsvektor
f_c	Hz	Eckfrequenz
G	N	Gewichtskraft
\underline{G}	N	Gewichtskraftvektor
\widehat{G}	N	Gewichtskraftvektor (Simulation)
\underline{g}	–	Funktionsvektor
\underline{H}	m	Flughöhe
\underline{I}	kg · m ²	Trägheitstensor
I_x, I_y, I_z	kg · m ²	Hauptträgheitsmomente
I_{xy}, I_{yz}, I_{xz}	kg · m ²	Deviationsmomente
i, j, k	–	Laufvariablen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
J	verschieden	Zielfunktion
J_P	–	Propellerfortschrittsgrad
K_g	–	Böenabminderungsfaktor
k	N/m	Federkonstante
k	Nm	Kalibrierungsfaktor Flügel-DMS
k_1, k_2, k_3	m	Hilfskoordinaten
L	m	Wellenlänge der Turbulenz
\underline{L}	N, Nm	Kräfte- und Momentenvektor
$\underline{\underline{L}}$	–	Verstärkungsmatrix
l	m	Längenmaß
l	Nm	Moment um die Flugzeuglängsachse
l_μ	m	Profiltiefe
l_{Boe}	m	Böengradient
M	–	Anzahl Zeitschritte
M	–	Gesamtanzahl lokal-linearer Modelle im LMN
M	Nm	Moment
\widehat{M}	Nm	Moment (Simulation)
M	-	Quadratische Approximation der Zielfunktion
\underline{M}	Nm	Momentenvektor
$\underline{\underline{M}}$	–	Transformationsmatrix
m	kg	Masse
m	Nm	Moment um die Flugzeugquerachse
m_r	kg	Referenzmasse
N	–	Gesamtanzahl
n	1/min	Drehzahl
n	–	Lastvielfaches
n	–	Laufvariable
n	Nm	Moment um die Flugzeughochachse
$n(s)$	rad/s	Rauschsignal im Frequenzbereich
n_y	–	Dimension des Messgrößenvektors
\underline{P}_0	m	Startkoordinaten der Flugzeugposition
$\underline{\underline{P}}$	–	Parameterfehlerkovarianzmatrix
p	–	Dimension des Eingangsraums der LMN-Methode
p	–	Likelihood-Funktion

Zeichen	Einheit	Bedeutung
p, q, r	°/s	Drehraten
p^*, q^*, r^*	–	Normierte Drehraten (gemäß DIN 9300 [14])
p_W	–	Eintrittswahrscheinlichkeit für Turbulenz
p_∞	Pa	Statischer Druck der Anströmung
Q	N	Querkraft
\underline{Q}	Nm	Momentenvektor
$\underline{\underline{Q}}$	–	AIC-Matrix (aerodynamic influence coefficients)
q	N/m	Streckenlast
\bar{q}	Pa	Staudruck
\underline{q}	verschieden	Vektor des Prozessrauschens
$\widehat{\underline{R}}^A$	N	Vektor der Luftlasten (Simulation)
$R_{p0,2}$	N	Dehngrenze mit 0,2% plastischer Verformung
\underline{R}	verschieden	Messfehlerkovarianzmatrix
\underline{r}	N, Nm	Vektor der Lastenberechnungsfehler
S	m ²	Flügelfläche
\underline{S}	N, Nm	Schnittlastenvektor
s	m	Halbspannweite
Δ	–	Laplace-Operator
\underline{s}_g	m	Vektor der Positionskoordinaten
$\widehat{\underline{s}}_g$	m	Vektor der Positionskoordinaten (Simulation)
T	N	Schubkraft
\underline{T}	–	Transformationsmatrix
t	s	Zeit
u, v, w	m/s	Komponenten des Fluggeschwindigkeitsvektors
\underline{u}	verschieden	Eingangsgrößenvektor
$\widehat{\underline{u}}$	verschieden	Eingangsgrößenvektor (Simulation)
V	m/s	Fluggeschwindigkeit
\underline{V}	m/s	Fluggeschwindigkeitsvektor
$\widehat{\underline{V}}_W$	m/s	Windgeschwindigkeitsvektor (Simulation)
\underline{v}	verschieden	Vektor des Messrauschens
W	N	Widerstandskraft
W	–	Whang-Index (Bewertungskriterium)
w	–	Modellparameter im Lokalmodellnetz
w	–	Komponenten der aerodynamischen Einflussgrößen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
\underline{w}	–	Vektor der aerodynamischen Einflussgrößen
\underline{w}	–	Vektor der Parameter im Lokalmodellnetz
\underline{w}	verschieden	Vektor des Prozessrauschens
x,y,z	m	Ortskoordinaten
\underline{X}	m	Ortsvektor
x_A	–	Faktor des äquivalenten Biegemoments
\underline{x}	verschieden	Zustandsgrößenvektor
$\widehat{\underline{x}}$	verschieden	Zustandsgrößenvektor (Simulation)
y_A	m	Hebelarm der Auftriebskraftresultierenden
\underline{y}	verschieden	Ausgangsgrößenvektor
$\widehat{\underline{y}}$	verschieden	Ausgangsgrößenvektor (Simulation)
Z^A	N	Auftriebskraft
\underline{z}	verschieden	Störgrößenvektor
$\widehat{\underline{z}}$	verschieden	Störgrößenvektor (Simulation)

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	°	Anstellwinkel
β	°	Schiebewinkel
Δ	verschieden	Abweichung, Fehler
Δ	—	Korrektursignal im hybriden Beobachter
∇	—	Nabla-Operator
ϵ	%	Dehnung
$\underline{\epsilon}$	°	Abwindwinkel
ζ	°	Winkel des Seitenruderausschlags
η	°	Winkel des Höhenruderausschlags
Θ	°	Nicklagewinkel
Θ	—	Modellparameter
$\underline{\Theta}$	—	Vektor der Modellparameter
κ	°	Nicklagewinkel des Flugzeuges in Bodenlage
Λ	—	Flügelstreckung
μ	wie Maßzahl	Mittelwert
ν	°	Flügelchränkung
ξ	°	Winkel des Querruderausschlags
ρ	kg/m ³	Luftdichte
σ	wie Maßzahl	Standardabweichung
$\tau(s)$	rad/s	Turbulenzsignal im Frequenzbereich
Φ	°	Gewichtungsfunktion im LokalmodeNetz
Φ	°	Hängewinkel
ϕ	°	Flügelpfeilung
φ	—	Phase (Bewertungskriterium)
$\underline{\Phi}$	°	Vektor der Eulerwinkel
$\widehat{\underline{\Phi}}$	°	Vektor der Eulerwinkel (Simulation)
Ψ	°	Azimutwinkel
χ	—	Korrelationskoeffizient
$\underline{\Omega}$	rad/s	Drehratenvektor
$\widehat{\underline{\Omega}}$	rad/s	Drehratenvektor (Simulation)
ω	rad/s	Frequenz

Indizes

Index	Bedeutung
0	= Anfangszustand
A	= Aerodynamik
A	= Auftrieb
AS	= Anstellwinkelschwingung
a	= aerodynamisch
BL	= Bodenlage
Beob	= Beobachter
c	= Cruise (Reiseflug)
Des	= modifiziertes Designmodell
d	= deterministisch
e	= erweitert
e	= experimentell
FL	= linke Flügelhälfte
FR	= rechte Flügelhälfte
FW	= Flügelwurzel
Flg	= Flügel
Flz	= Flugzeug
f	= flugzeugfest
fttr	= freitragend
GL	= Grenzlast
g	= geodätisch
ges	= gesamt
gyr	= gyroskopisch
Hbk	= Handbuch-Methode
HF	= Hauptfahrwerk
HFL	= linkes Hauptfahrwerk
HFR	= rechtes Hauptfahrwerk
HLL	= linke Höhenleitwerksflosse
HLR	= rechte Höhenleitwerksflosse
HR	= High-G-Roll
Hyb	= hybrider Lastenbeobachter
i,j	= Laufvariablen

Index	Bedeutung
int	= Interferenz
K	= Flugbahn
k	= flugbahnfest
k	= Stabilisierungsgrößen
Kal	= Kalibrierung
l	= rollen
L	= Strukturlasten
L	= Luft
LA	= Auflagerlast A
LB	= Auflagerlast B
LB	= Längsbewegung
LC	= Auflagerlast C
LL	= Limit Load (sichere Last)
LS	= Laststation
Lue	= Luenberger-Beobachter
M	= Masse
M	= Mittel
MA	= Manöver
MP	= Massepunkt
MTOW	= maximum takeoff weight (maximale Abflugmasse)
Mes	= Messung
Mot	= Motor
m	= nicken
max	= maximal
mean	= mittel
min	= minimal
n	= gieren
NE	= never exceed (Index der maximalen Fluggeschwindigkeit)
P	= Parameter
P	= Propeller
PP	= Pushover-Pullup
PH	= Phygoidschwingung
Pnl	= Panel (Elementarflügel)
PR	= Propellerkraftangriffspunkt

Index	Bedeutung
Q	= Querkraft
QMes	= Quasi-Messung (Simulationsdaten)
R	= Rumpf
r	= Residuum
r	= bezogen auf den Referenzpunkt
RL	= Rollbewegung
RL	= Referenzlage
RP	= Referenzpunkt
S	= Schub
SB	= Seitenbewegung
SF	= Spornfahrwerk
SF	= stationärer Flug
SH	= stationärer Horizontalflug
SP	= Schwerpunkt
SL	= Seitenleitwerk
s	= Strecke
rel	= relativ
T	= Torsion
T	= Triebwerk
T	= Turbulenz
t	= Total
TS	= Taumelschwingung
W	= Widerstand
W	= Wind
z	= Störgrößen
zul	= zulässig

Abkürzungen

Abk.	Bedeutung
A/D	= Analog/Digital
ASM	= Anstellwinkelschwingungsmanöver
BFGS	= Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno-Algorithmus
BVM	= Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver
CAN	= Controller Area Network
DMS	= Dehnungsmessstreifen
DP	= Datenpunkt
DP	= Drehpunkt
FS	= full scale
GL	= Grenzlast
HL	= Höhenleitwerksflosse
HRM	= High-G-Roll-Manöver
IMU	= Inertial Measurement Unit
I/O	= Input/Output
KOS	= Koordinatensystem
LL	= sichere Last (Limit Load)
LLM	= Lokal-lineares Modell
LMN	= Lokalmodellnetz
LS	= Laststation
MEMS	= Mikro-Elektro-Mechanisches System
MIMO	= multiple input multiple output
MISO	= multiple input single output
MOPS	= Multi-Objective Parameter Synthesis
MP	= Massepunkt
MTOW	= maximum takeoff weight (maximale Abflugmasse)
PAC	= Programmable Automation Controller
PHM	= Phygoïdmanöver
PPM	= Pushover-Pullup-Manöver
RLM	= Rollmanöver
SIGMA	= Subspace Identification for Generic Modelling and Analysis
SP	= Schwerpunkt
SQP	= Sequentielle Quadratische Programmierung

Abk.	Bedeutung
SSM	= Steady-Heading-Steady-Sideslip-Manöver
STF	= Stationärer Flug
SVM	= Schubvariationsmanöver
TAPS	= Turbulence Auto Pilot Report System
TRN	= Kurvenflüge
TSM	= Taumelschwingungsmanöver
VLM	= Vortex-Lattice-Methode
WSM	= Wingsleveled-Sideslip-Manöver
