

Lokalmodell-Netz-Identifikation als Analyse- und Bewertungsmethodik von Flugmanöverlasten

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

genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing.
Martin Halle

aus
Erfurt

2016

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

2. Gutachter: Prof. Dr. Herbert Werner
Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Mai 2015

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 1/2016

Martin Halle

**Lokalmodell-Netz-Identifikation als Analyse- und
Bewertungsmethodik von Flugmanöverlasten**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4306-8

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 am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Für die Betreuung und Begutachtung sowie für die Unterstützung und wertvollen Hinweise im Rahmen der Erstellung meiner Dissertation danke ich Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke. Ebenso gilt mein Dank für die Erstellung des zweiten Gutachtens Prof. Dr. Herbert Werner.

Für die fachlichen Diskussionen, Bereitstellung von Informationen und Unterstützung im Allgemeinen danke ich ebenso den Projektpartnern der Airbus Operations GmbH.

Ein weiterer Dank gilt meinen Kollegen am Institut, die mich in der Zeit meiner Dissertation begleitet haben.

Insbesondere danke ich meiner Familie, dass sie mich tatkräftig unterstützt und motiviert hat. Ich widme diese Arbeit meiner Frau und meinen beiden Kindern.

Winsen (Luhe), 2016

Martin Halle

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Gliederung	6
2 Bestimmung von Fluglasten und Begriffsklärung	9
2.1 Flugphysikalische Grundlagen	10
2.2 Struktur-Auslegungsprozess und Wartungsaspekte	20
2.3 Begriffsklärung	29
2.4 Grundlegende Konzepte zur Bestimmung von Lasten	31
3 Bisherige Systeme zur Fluglastschätzung und Motivation der Arbeit	39
3.1 Literaturübersicht über Systeme zur Schätzung von Fluglasten	41
3.2 Zusammenfassung und Motivation	53
4 Identifikation und Modellierung mit Lokalmittel-Netzen	59
4.1 Neuronale Netze	61
4.1.1 Feed Forward Neuronale Netze (FFNN)	62
4.1.2 Radiale Basisfunktionen Netze (RBF)	64
4.1.3 Rekurrente Neuronale Netze (RNN)	65
4.1.4 Bewertung und Fazit	65
4.2 Lokalmittel-Netze	66
4.3 Mathematische Beschreibung	70
4.4 Teilungsalgorithmus	75
4.5 Spezielle Aspekte der Lokalmittel-Netz-Identifikation	79
4.5.1 Vorstrukturierung	80
4.5.2 Extrapolationsverhalten und Symmetrieeigenschaften	82
4.5.3 Robustifizierung der Modelle	83

4.5.4	Erweiterte Teilungssteuerung	91
4.5.5	Nachbarschaftsbeziehungen in Lokalmittel-Netzen	97
4.5.6	Extremwertanalyse in Lokalmittel-Netzen	101
4.5.7	Parameteroptimierung	102
5	Lokalmittel-Netze als virtueller Lastsensor	105
5.1	Selektion und Vorverarbeitung der Eingangsdaten	106
5.1.1	Aufteilung der Datenbasis in Flugmanöver	107
5.1.2	Prozess der Datenselektion	112
5.2	Analysewerkzeuge zur Bewertung der virtuellen Lastsensoren	117
5.2.1	Korrelation unter Berücksichtigung der Toleranzbänder	118
5.2.2	Parameter Grenzen der Teilmodelle	119
5.2.3	Analyse anhand der Modellgewichte	121
5.2.4	Performanzindikatoren	123
5.2.5	Radial-Koeffizient	125
5.2.6	Residuen/Ausreißer-Histogramm	127
5.3	Vorgehensweise zur Lokalmittel-Netz-Identifikation	127
6	Ergebnisse der Synthese virtueller Lastsensoren	131
6.1	Virtuellen Lastsensoren auf Basis ausgewählter Flugmanöver	133
6.2	Datenselektion für das Seitenleitwerk	147
6.3	Virtuelle Lastsensoren für das Seitenleitwerk	152
6.4	Datenselektion für das Höhenleitwerk	167
6.5	Virtuelle Lastsensoren für das Höhenleitwerk	168
6.6	Virtuelle Lastsensoren für Rumpfsktionen	179
6.7	Sensitivitätsstudien	185
6.8	Anpassung der virtuellen Lastsensoren anhand von Messdaten	194
6.8.1	Analyse und Anpassung an Messdaten für das Seitenleitwerk anhand einzelner Manöver	197
6.8.2	Anpassung der virtuellen Lastsensoren für das Seitenleitwerk an Messdaten	201
6.8.3	Anpassung der virtuellen Lastsensoren für das Höhenleitwerk an Messdaten	202
6.8.4	Zusammenfassung	206
6.9	Diskussion der Ergebnisse	208
7	Zusammenfassung und Ausblick	213

A	Ergänzende Abbildungen zu Validierungsrechnungen	217
A.1	Seitenleitwerk	217
A.2	Höhenleitwerk	224
A.3	Rumpfsektionen	233
B	Softwareframework SIGMA	239
	Literaturverzeichnis	243