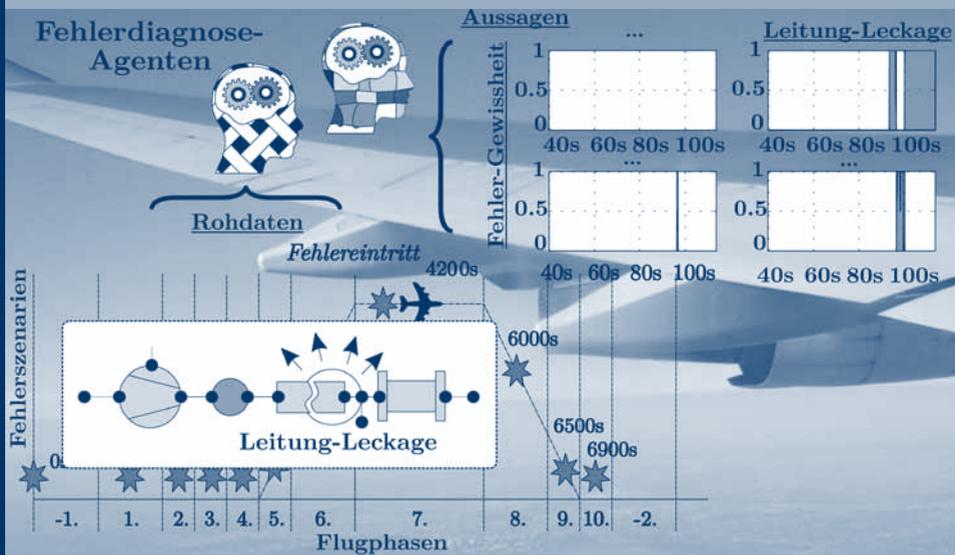


Christian Modest  
Hamburg

# Methodik zur Entwicklung einer hierarchischen agenten-basierten Fehlerdiagnose für Flugzeugsysteme



02-2018

**Methodik zur Entwicklung einer hierarchischen  
agenten-basierten Fehlerdiagnose für  
Flugzeugsysteme**

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

von Dipl.-Ing.  
**Christian Modest**

aus Hamburg

2018

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

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

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Februar 2018

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 2/2018

**Christian Modest**

**Methodik zur Entwicklung einer  
hierarchischen agenten-basierten Fehlerdiagnose  
für Flugzeugsysteme**

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-Harburg, 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 978-3-8440-6003-4

ISSN 1861-5279

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Mein Doktorvater Herr Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke ist während meines Studiums auf mich aufmerksam geworden und hat mir angeboten, nach dem Studienabschluss als wissenschaftlicher Mitarbeiter an seinem Institut zu arbeiten. Dafür danke ich ihm sehr. Zudem bedanke ich mich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die mir gewährten Freiräume und die Möglichkeit zur Vorstellung und Diskussion meiner wissenschaftlichen Inhalte auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen. All das hat zu dieser Arbeit geführt. Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Werner danke ich für seine Bereitschaft, das Zweitgutachten zu verfassen.

Die inhaltlichen Grundlagen dieser Arbeit entstanden im Rahmen von Forschungsprojekten in Zusammenarbeit mit der Airbus Operations GmbH. Meinem Projektpartner und insbesondere Cornelia Mädiger danke ich für die sehr angenehme Zusammenarbeit und das große Vertrauen in meine Fähigkeiten.

Sehr herzlich danke ich allen Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen, die mich während meiner Zeit am Institut begleitet haben. Es war eine schöne Zeit, in der ich mich fachlich und menschlich stark weiterentwickelt habe. In guter Erinnerung wird mir stets die kollegiale Atmosphäre bleiben. Für die tiefe freundschaftliche Verbundenheit danke ich Tobias Kreitz, Kevin Poole, Enno Vredenburg, Dennis Doberstein und Matthias Krings. Stellvertretend für die Institutsmitarbeiter danke ich Monika Wittke, Todd Parry, Detlef Lehmann und Georg Schindler. Zudem bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Studenten, insbesondere Robert Doering, Lars Kuhn und Christian Krüger, die durch ihre Arbeiten wichtige Beiträge zu dieser Dissertation geleistet haben.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für den Rückhalt, die Unterstützung und Ermutigung, dieses Vorhaben erfolgreich abzuschließen. Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Valerie Bröchler.

Hamburg, im Mai 2018

Christian Modest



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>xix</b>
Formelzeichen . . . . .	xix
Indizes . . . . .	xxi
Abkürzungen . . . . .	xxii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik . . . . .	2
1.1.1 Technologie und Methodik . . . . .	3
1.1.2 Prozess . . . . .	6
1.1.3 Werkzeuge . . . . .	8
1.1.4 Zusammenfassender Vergleich und Diskussion . . . . .	10
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	12
1.3 Gliederung der Arbeit . . . . .	13
<b>2 Fehlerdiagnose heutiger Verkehrsflugzeuge</b>	<b>15</b>
2.1 Begriffsdefinitionen . . . . .	15
2.1.1 Fehler . . . . .	15
2.1.2 Fehlerdiagnose . . . . .	19
2.2 Historische Entwicklung . . . . .	21
2.3 Aktuelle Ausführung einer Fehlerdiagnose . . . . .	25
2.4 Diskussion und Bewertung . . . . .	29
<b>3 Agenten-basierte Fehlerdiagnose</b>	<b>31</b>
3.1 Zustandsänderung . . . . .	31
3.2 Funktionale Ebenen . . . . .	34

3.3	Elemente und Architektur . . . . .	36
3.3.1	Anforderungen an Gesamtkonzept . . . . .	36
3.3.2	Lösungsansätze für die Fehlerdiagnose . . . . .	38
3.4	Gesamtkonzept für die Fehlerdiagnose an Bord eines Flugzeuges	39
<b>4</b>	<b>Entwicklungsprozess für Fehlerdiagnose-Agenten</b>	<b>51</b>
4.1	Rahmen der Entwicklung einer Fehlerdiagnose . . . . .	51
4.2	Ablauf der Entwicklung einer Fehlerdiagnose . . . . .	54
4.2.1	Schritt 1: Modellbildung und Simulation . . . . .	54
4.2.2	Schritt 2: Ursache-Wirkungs Matrizen . . . . .	54
4.2.3	Schritt 3: Analyse . . . . .	54
4.2.4	Schritt 4: Bewertung . . . . .	56
4.2.5	Schritt 5: Coding . . . . .	56
4.2.6	Schritt 6: Implementierung . . . . .	56
4.3	Werkzeug zur Entwicklung einer Fehlerdiagnose . . . . .	57
4.3.1	Modul 1: Fehler-Effekt Modellierung . . . . .	57
4.3.2	Modul 2: Indikator- und Sensorauswahl . . . . .	58
4.3.3	Modul 3: Regelgenerierung . . . . .	58
4.3.4	Modul 4: Konfiguration der Fehlerdiagnose-Engine . . .	58
<b>5</b>	<b>Modellbildung und Simulation von Fehlverhalten</b>	<b>59</b>
5.1	Modellierung von Fehlern . . . . .	59
5.1.1	Modellierungsansatz . . . . .	60
5.1.2	Beispiele . . . . .	62
5.2	Simulation von Fehlern . . . . .	73
5.2.1	Randbedingungen . . . . .	73
5.2.2	Fehlerszenarien . . . . .	74
5.3	Auswertung von Fehlereffekten . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Analyse von Ursache-Wirkungs Matrizen</b>	<b>87</b>
6.1	Analyse von Fehler-Indikator Matrizen . . . . .	87
6.1.1	Bildung von Fehler-Indikator Matrizen . . . . .	89
6.1.2	Analyse der Reihenfolge von Indikatoren . . . . .	94
6.1.3	Detektion von Fehlern . . . . .	97
6.1.4	Isolation von Fehlern . . . . .	101

6.1.5	Bewertung von Indikatormengen . . . . .	109
6.1.6	Anwendung exakter Fehlerdiagnoseregeln . . . . .	112
6.1.7	Weiterführende Bewertung von Fehler-Merkmalen . . .	114
6.2	Analyse von Fehler-Merkmal Matrizen . . . . .	117
6.2.1	Grundlagen der <i>Fuzzy</i> Logik und <i>Fuzzy</i> Inferenz . . . .	118
6.2.2	Automatisierungsansätze zur Generierung von <i>Fuzzy</i> Regeln . . . . .	121
6.2.3	Algorithmus zur Generierung von <i>Fuzzy</i> Fehlerdiagno- seregeln . . . . .	123
6.2.4	Anwendungsbeispiel von Fuzzy Fehlerdiagnoseregeln . .	135
<b>7</b>	<b>Implementierung von Fehlerdiagnose-Agenten</b>	<b>137</b>
7.1	Ablauf der Implementierung von Fehlerdiagnose-Agenten . . . .	137
7.2	Dokumentenstruktur und Module . . . . .	140
7.3	Expertensysteme . . . . .	141
<b>8</b>	<b>Demonstration am Beispiel des multifunktionalen Brennstoffzellen- systems</b>	<b>143</b>
8.1	Motivation für den Einsatz von Brennstoffzellen in der Luftfahrt	143
8.2	Integration von Brennstoffzellen an Bord von Verkehrsflugzeugen	144
8.3	Referenzarchitektur . . . . .	146
8.4	Entwicklung einer Fehlerdiagnose-Engine . . . . .	148
8.4.1	Fehlerszenarien . . . . .	149
8.4.2	Ergebnisse der Fehlersimulation . . . . .	149
8.4.3	Analyse von Ursache-Wirkungs Matrizen und Erzeu- gung von Fehlerdiagnoseregeln . . . . .	151
8.4.4	Demonstration der Fehlerdiagnose-Engine . . . . .	154
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>171</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>175</b>
A.1	Übersicht von Verfahren der Fehlerdiagnose . . . . .	175
A.1.1	Fehlerdetektion . . . . .	175
A.1.2	Fehlerisolation . . . . .	177
A.1.3	Fehleridentifikation . . . . .	191

A.2 Tabellen . . . . .	195
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>201</b>