Thorsten Engelhardt

Zustandsbezogenes on-board Instandhaltungsmanagementsystem für mobile Systeme

Cuvillier Verlag Göttingen

Zustandsbezogenes on-board Instandhaltungsmanagementsystem für mobile Systeme

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Informatik und Automatisierung
der Technischen Universität Ilmenau

von Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Engelhardt
geboren am 28. November 1971 in Bad Hersfeld

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wernstedt, Fraunhofer-AST, Ilmenau
Prof. Dr.-Ing. St. Lambeck (JP), TU Ilmenau
Prof. Dr.-Ing. B. Cuno, Hochschule Fulda

Tag der Einreichung: 20.02.2006

Tag der öffentlichen Aussprache: 20.04.2007

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2007
Zugl.: (TU) Ilmenau, Univ., Diss., 2007

978-3-86727-232-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2007
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2007
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-232-2

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit als Doktorand bei der DaimlerChrysler AG, Forschung und Technologie, in Kooperation mit der Fakultät für Informatik und Automatisierung der TU Ilmenau.

Dem ehemaligen Leiter des Fachgebiets Systemanalyse, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Wernstedt, danke ich für die Möglichkeit zur wissenschaftlichen Arbeit an seinem Lehrstuhl, seine Unterstützung und fachlichen Anregungen sowie für die Übernahme des Hauptreferates.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Cuno, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Hochschule Fulda, für die Förderung, die Übernahme des Korreferates und für seine konstruktiven Anregungen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. (JP) Steven Lambeck, Fachgebiet Automatisierungstechnik der TU Ilmenau, bedanke ich mich für sein Interesse und die bereitwillige Übernahme des Korreferates.

Ferner bedanke ich mich bei der DaimlerChrysler AG sowie bei allen Kolleginnen und Kollegen für ihre Hilfsbereitschaft und die gute Zusammenarbeit.

Ein besonderes Dankeschön gilt meiner Freundin Tanja, die durch ihr großes Verständnis und ihre Unterstützung diese Arbeit ermöglicht hat.

Leinfelden-Echterdingen, April 2007 Thorsten Engelhardt

Es kommt nicht darauf an,
die Zukunft vorherzusagen,
sondern auf die Zukunft
vorbereitet zu sein.

(Perikles)

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis VIII
Liste der Formelzeichen IX

1 Einleitung 1
1.1 Problemstellung 1
1.2 Aktueller Stand der Instandhaltungsorganisation 2
1.2.1 Vorbeugende Instandhaltung 3
1.2.2 Vorbeugende Instandhaltung mit nutzungsabhängigen Intervallen 3
1.2.3 Rechnerbasierte on-board Instandhaltung 3
1.2.4 Rechnerbasierte on-/off-board Instandhaltung 4
1.2.5 Flotteninstandhaltungsmanagement 5
1.2.6 Bewertung 5
1.3 Zielsetzung der Arbeit 7
1.4 Gliederung der Arbeit 7
2 Ganzheitlicher Systemansatz des Instandhaltungsmanagementsystems 10
2.1 Analyse der Instandhaltungsanforderungen 10
2.1.1 Schädigung als Ursache der Instandhaltung 10
2.1.2 Maßnahmen der Instandhaltung 11
2.1.3 Instandhaltungsstrategien 12
2.2 On-board Systemansatz 14
3 Beschreibung des Betriebsmittelzustandes 17
3.1 Verfahren zur Zustandsbeschreibung 18
3.1.1 Direkte Verfahren 21
3.1.2 Indirekte Verfahren 21
3.1.3 Kenngrößenbasierte Verfahren 25
3.1.4 Belastungsbasierte Verfahren 26
3.1.5 Zuverlässigkeitsbasierte Verfahren 28

3.2 Bewertung und Gegenüberstellung der Verfahren ... 30
3.3 Notation des Betriebsmittelzustandes ... 32
3.4 Anwendungen zur Zustandsbeschreibung ... 33
3.4.1 Motoransaugluftfilter ... 33
3.4.2 Fahrwerkskomponenten ... 37
4 Ermittlung des Instandhaltungsbedarfs ... 41
4.1 Zustandsüberwachung ... 41
4.1.1 Überwachung des Beobachtungsraumes ... 42
4.1.2 Überwachung des Merkmalsraumes ... 43
4.1.3 Überwachung der skalaren Zustandsgröße ... 43
4.2 Vorhersage des Nutzungsendpunktes ... 44
4.2.1 Grundlagen ... 45
4.2.2 Voraussetzungen zur Vorhersage ... 48
4.2.3 Verfahren zur Vorhersage des Nutzungsendpunktes ... 49
4.2.4 Erhöhung der Zuverlässigkeit und Sicherheit der Nutzungsvorhersage ... 52
4.2.5 Vorhersage auf Basis des CUSUM-Tests ... 54
4.2.6 Vergleich der Vorhersageverfahren ... 63
4.3 Aggregation der Informationsquellen ... 73
4.3.1 Grundlagen und Voraussetzungen ... 73
4.3.2 Beschreibung der Informationsquellen ... 74
4.3.3 Aggregation der Informationsquellen ... 75
4.3.4 Anwendungsbeispiel zur Aggregation ... 76
5 Instandhaltungsplanung ... 79
5.1 Grundlagen zur on-board Instandhaltungsplanung ... 80
5.1.1 Voraussetzungen und Einschränkungen ... 80
5.1.2 Datenmodell zur Instandhaltungsplanung ... 80
5.1.3 Wirtschaftlichkeit als Grundlage der Instandhaltungsplanung ... 83
5.2 Planungsalgorithmus ... 86
5.2.1 Bestimmung des folgenden Servicepunktes ... 87
5.2.2 Bestimmung des Serviceinhalts ... 92
5.2.3 Beschreibung des Instandhaltungsplans ... 97

5.2.4 Anwendungsbeispiel der Planung 100
5.3 Life-Cycle Simulation der Instandhaltungsplanung 106
5.3.1 Softwaretechnische Umsetzung und Realisierung der Testumgebung 107
5.3.2 Szenarien 108
5.3.3 Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse 109
6 On-/Off-board Schnittstelle 112
6.1 On-board Schnittstelle für den Nutzer und den Service 112
6.2 Off-board Schnittstelle für Telematikdienste 114
7 Zusammenfassung und Ausblick 117
7.1 Zusammenfassung 117
7.2 Ausblick 119

Anhang A – C 120
Literaturverzeichnis 134

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
AU	Abgasuntersuchung
BMW	Firmenbezeichnung: Bayerische Motoren Werke
CAN	Fahrzeug Bussystem (controller area network)
CBM	Condition Based Maintenance
CBS	Condition Based Service
CUSUM	cumulative sum
CUSUMSQ	cumulative sum of squares
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
FB	Fensterbreite
GPS	Global Positioning System
HFM-Sensor	Heißfilm-Luftmassenmesser
IMS	Instandhaltungsmanagementsystem
IH	Instandhaltung
LEAP	Life Extension Analysis and Prognostics
LIN	Fahrzeug Bussystem (local interconnect network)
MAN	Firmenbezeichnung: Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg
MMI	Men Machine Interface
MMS	Maintenance Management System
MTU	Firmenbezeichnung: Maschinen Triebwerks Union
OSA-CBM	Open System Architecture for Condition Based Maintenance
QLT-Sensor	Öl-Sensor für die Qualität, Füllstand und Temperatur
RW	Rolling-Window
SCR	Selective Catalytic Reduction
SMS	Short Message Service
SOH	State of Health
TU	Technische Untersuchung
TÜV	Technischer Überwachungsverein

Liste der Formelzeichen

Formelzeichen aus Kapitel 3:

B	Beobachtungsraum
B_i	Belastung der i-ten Nutzung
c_{sk}	Staubkonzentrationsfaktor
f(x)	Ausfalldichtefunktion
F(x)	Ausfallwahrscheinlichkeit
M	Merkmalsraum
$\underline{\mathbf{N}}$	Störgrößenvektor
$N(\sigma_m, \sigma_a)$	materialspezifische Wöhlerkennline
$\underline{\mathbf{P}}$	Vektor mit Prozesskoeffizienten
r	Regenmenge
R(x)	Zuverlässigkeit
S	Gesamtschädigung
s_i	Schadensbeitrag der i-ten Nutzung
S_{max}	maximale Schädigung
T_i	Dauer der i-ten Nutzung
$\underline{\mathbf{U}}$	Eingangsgrößenvektor
U(t)	Beanspruchungszeitsignal
v_{Fzg}	Fahrzeuggeschwindigkeit
$\dot{v}_{Luft}$	Luftvolumenstrom durch den Motoransaugluftfilter
V_{Luft}	angesaugtes Luftvolumen
$\underline{\mathbf{X}}$	Zustandsgrößenvektor des realen Systems
$\underline{\mathbf{X}}'$	Zustandsgrößenvektor des Modells
x	allgemeine nicht spezifizierte Betriebsgröße (z. B. Zeit, Strecke, ...)
$\underline{\mathbf{Y}}$	Ausgangsgrößenvektor des realen Systems
$\underline{\mathbf{Y}}'$	Ausgangsgrößenvektor des Modells
z_j	Zustandsgröße des j-ten Betriebsmittels
Z_j^W	Warnschwelle des j-ten Betriebsmittels
$\underline{\Theta}$	Parametervektor des realen Systems

$\underline{\Theta}'$	Parametervektor des Modells
α	Ausfallwahrscheinlichkeit
σ_a	Schwingungsamplitude
σ_m	Mittelwert der Schwingung

Formelzeichen aus Kapitel 4:

$BM_{j,i}$	i-te Betriebsmittelinformation des j-ten Betriebsmittels
C	Konstante für Fensterbreite
$c_\alpha(r)$	Signifikanzgrenze
$\bar{e}$	mittlerer Vorhersagefehler
e_i	Vorhersagefehler der i-ten Vorhersage
FB	Fensterbreite des Auswertefensters
GG_j	Grenzgradient des j-ten Betriebsmittels
H	Vorhersagehorizont
h_α	heuristischer Parameter für Signifikanzniveau
IB	Instandhaltungsbedarf des mobilen Systems
K	Anzahl der freien Parameter des Regressionsmodells
M	Anzahl der instandhaltungsrelevanten Betriebsmittel
MSFE	mittlerer quadratischer Vorhersagefehler
n_j	Anzahl der Informationsquellen des j-ten Betriebsmittels
r_0'	korrigierter Punkt der Grenzwertverletzung
r_0	Punkt der Grenzwertverletzung
s_A	aktueller Kilometerstand
SD	Standardabweichung des Vorhersagefehlers
s_j	aggregierter Nutzungsendpunkt des j-ten Betriebsmittels
$s_{j,i}$	Nutzungsendpunkt des j-ten Betriebsmittels und der i-ten Informationsquelle
T	Zeit
T_0	Zeitpunkt des Strukturbruches
$t_{FB-2,1-\varepsilon/2}$	(1-ε)-Quantil einer t-Verteilung mit FB-2 Freiheitsgraden
t_R	Restlaufzeit
u_t	Fehler der t-ten Beobachtung

w_τ	standardisierter 1-Schritt Vorhersagefehler
W_r	kumulierter 1-Schritt Vorhersagefehler
x	allgemeine nicht spezifizierte Betriebsgröße (z. B. Zeit, Strecke, ...)
$\bar{x}$	Betriebsgröße in der Basiseinheit der Instandhaltung
x_A	aktueller Nutzungspunkt
x_N	vorhergesagter Nutzungsendpunkt
$\tilde{x}_N$	tatsächlicher Nutzungsendpunkt
x_R	Restnutzung
$\mathbf{x_t}$	Regressorvektor der Betriebsgröße der t-ten Beobachtung
$\mathbf{X_t}$	Regressormatrix
$z_\varepsilon^O(x)$	obere Konfidenzgrenze der Regressionsfunktion
$z_\varepsilon^U(x)$	untere Konfidenzgrenze der Regressionsfunktion
z_j	Zustandsgröße des j-ten Betriebsmittels
$\dot{z}_j$	Gradient der j-ten Zustandsgröße
$z_{j,i}$	Zustandsgröße des j-ten Betriebsmittels und der i-ten Informationsquelle
Z_j^W	Warnschwelle des j-ten Betriebsmittels
z_t	Zustandswert der t-ten Beobachtung
$\mathbf{z_t}$	Beobachtungsvektor des Zustandswerte
$\boldsymbol{\beta}$	Vektor mit Regressionskoeffizienten
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung
$\boldsymbol{\psi}$	Einfluss des Betriebsgrößenvektors auf den Zustand
$\boldsymbol{\varphi}$	Betriebsgrößenvektor
ε	Wahrscheinlichkeit des Konfidenzintervalls
α	Signifikanzniveau
$\Omega(x)$	allgemeine Transformationsfunktion in die Basiseinheit
$\Omega_{t_s}(s)$	spezielle Transformationsfunktion der Zeit t in eine Strecke s
$\Theta_{j,i}(BM_{j,i})$	Abbildungsfunktion der diskreten Betriebsmittelzustände in die Basiseinheit der Instandhaltung
λ_t	Gewichtungsfaktor

Formelzeichen aus Kapitel 5:

AK_i	Arbeitskosten der i-ten Instandhaltung
Aw	Arbeitswert der Instandsetzung
AZ_i	Arbeitszeit der i-ten Instandhaltung
D	Teilmenge der Servicepositionsmenge
IB	Instandhaltungsbedarf des mobilen Systems
IFK	Instandhaltungsfixkosten
$\mathbf{IP_i}$	Instandhaltungsplan der i-ten Instandhaltung
KB_i	Komfortbeeinträchtigung der i-ten Instandhaltung
KV_i	Kostenverlust der i-ten Instandhaltung
kv_j	Kostenverlust des j-ten Betriebsmittels
LC	Anzahl der Servicepunkte innerhalb des Life-Cycles
m	Anzahl der Servicepositionen
PFK	persönliche Fixkosten
RK_i	Rechnungskosten der i-ten Instandhaltung
RKV_i	relativer Kostenverlust der i-ten Instandhaltung
RV_i	Reichweitenverlust der i-ten Instandhaltung
RW_i	prognostizierte Reichweite der i-ten Instandhaltung
RW_{LC}	Endreichweite des Life-Cycles
RW_{LP}	Reichweite zur nächsten Leitposition
RW_{MIN}	Mindestreichweite zwischen zwei Servicepunkten
RW_{SP}	Reichweite zur nächsten Standardposition
S_A	aktueller Kilometerstand
S_K	Komfortpunkt
S_{MAX}	Sicherheitsschwelle
$\mathbf{SM_i}$	Servicemenge der i-ten Instandhaltung
sm_j	j-tes Element der Servicemenge
SP	Servicepositionsmenge
sp_j	j-tes Element der Servicepositionsmenge
S_{RW}	Mindestreichweite
ST_i	Servicepunkt der i-ten Instandhaltung

TI_k	k-tes Termininterval l
TK_i	Teilekosten der i-ten Instandhaltung
T_W	zeitlicher Wunschtermin des Nutzers
v_1	Startpunkt des Vorschlagsintervalls
VIK_Σ	vollständige Life-Cycle Instandhaltungskosten
VIK_i	vollständige Instandhaltungskosten der i-ten Instandhaltung
V_k	k-tes Vorschlagsintervall
v_k^a	Anfang des k-ten Vorschlagsintervalls
v_k^e	Ende des k-ten Vorschlagsintervalls
V_{MAX}	maximales Vorschlagsintervall
$\Omega_{t_s}(s)$	spezielle Transformationsfunktion der Zeit t in eine Strecke s
Δ	Intervallbreite des Vorschlagsintervalls
η_1	Nutzervorgabe für den Komfort
η_2	Nutzervorgabe für die Wirtschaftlichkeit
μ_j	mittlere Nutzung des j-ten Betriebsmittels
σ_j	Standardabweichung der Nutzung des j-ten Betriebsmittels

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Bei mobilen Systemen, insbesondere bei Nutz-, Personen- und Schienenfahrzeugen, stehen die resultierenden Kosten zum Betrieb der Fahrzeuge immer stärker im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Für die Wirtschaftlichkeit des mobilen Systems sind die Kosten, die über den gesamten Zeitraum des Einsatzes entstehen von Interesse. Zu diesen Kosten, welche auch als Lebenszykluskosten (engl. Life-Cycle Cost) [SIE95] bezeichnet werden, zählen

- die Anschaffungskosten zu Beginn des Life-Cycles,
- die Betriebskosten und Instandhaltungskosten während des Life-Cycles
- sowie die Kosten für die Verschrottung zum Ende des Life-Cycles.

Die Lebenszykluskosten stellen aufgrund des gestiegenen Kostendrucks für den Nutzer des mobilen Systems ein kaufentscheidendes Kriterium dar. Aus diesem Grund sind die Hersteller von mobilen Systemen gezwungen, die einzelnen Kostenanteile der Lebenszykluskosten zu reduzieren um den wirtschaftlichen Erfolg ihrer Produkte zu sichern beziehungsweise Wettbewerbsvorteile gegenüber den Mitkonkurrenten zu erlangen.

Die Instandhaltungskosten, als ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Lebenszykluskosten, bestehen überwiegend aus Material- und Arbeitskosten. Tabelle 1-1 zeigt die jährlichen Instandhaltungskosten sowie den prozentualen Anteil an den Lebenszykluskosten für verschiedene Fahrzeugkategorien.

Instandhaltungskosten / Fahrzeugkategorie	Jährliche Instandhaltungskosten	Anteil an den Life-Cycle Kosten
Nutzfahrzeuge > 6 Tonnen [MER02]	5.625 €	8 %
Transporter [UNG99]	910 € – 3.400 €	10 % – 17 %
Personenfahrzeuge [BUB02]	1.230 €	15,6 %

Tabelle 1-1: Jährliche Instandhaltungskosten sowie deren prozentualer Anteil an den Life-Cycle Kosten für verschiedene Fahrzeugkategorien