

Chris Jan Louen

# Datenbasierte Zustands- überwachung in Personenkraftfahrzeugen mit Anwendung an einem Drei-Wege-Katalysator



Springer Vieweg

---

# Datenbasierte Zustandsüberwachung in Personenkraftfahrzeugen mit Anwendung an einem Drei-Wege-Katalysator

---

Chris Jan Louen

# Datenbasierte Zustands- überwachung in Personenkraftfahrzeugen mit Anwendung an einem Drei-Wege-Katalysator

 Springer Vieweg

Chris Jan Louen  
Duisburg, Deutschland

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation von Chris Jan Louen.

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steven X. Ding, Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann.  
Tag der mündlichen Prüfung 21.01.2016

ISBN 978-3-658-14444-9                      ISBN 978-3-658-14445-6 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-14445-6

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Duisburg-Essen im Fachgebiet Automatisierungstechnik und Komplexe Systeme (AKS).

Ganz besonders danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Steven X. Ding, Leiter des Fachgebietes AKS, für die umfassende wissenschaftliche Betreuung, die anregenden Diskussion und Unterstützung sowie für die Übernahme des Hauptreferates.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann, Leiter des Fachgebietes Elektronische Mess- und Diagnosetechnik (Technische Universität Berlin) bedanke ich mich für das große Interesse an dieser Arbeit und für die Bereitschaft zur Übernahme des Korreferates.

Das vorgestellte Konzept für die datenbasierte Zustandsüberwachung von dynamischen Betriebszuständen wurde im Rahmen eines mit der Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV) GmbH geführten Industrieprojektes entwickelt und getestet. Für die damit verbundene finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeit sowie das Vertrauen möchte ich mich an dieser Stelle, insbesondere bei dem zuständigen Fachbereichsleiter, Herrn Dipl.-Ing. M. Schultalbers, bedanken. Für die Unterstützung, fachliche Betreuung und die Einschätzung aus der Praxis seitens der IAV bedanke ich mich recht herzlich bei allen im Projekt Beteiligten und insbesondere bei Frau Dr. rer. nat. Guergana Dobreva, Herrn Dipl.-Ing. Ingolf Pietsch, Herrn Dipl.-Ing. Steffen Zwinzscher und Herrn Dr.-Ing. Nick Weinhold.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebietes AKS für die vielen hilfreichen Diskussionen, die immer wieder Anregungen zu neuen Ideen gegeben haben. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Adel Haghani, Frau Dr.-Ing. Birgit Köppen-Seliger, Herrn Dipl.-Ing. Eberhard Goldschmidt und Herrn M.Sc. Tim Königs für die vielen Diskussionen und Anregungen. Bei Herrn Dipl.-Ing. Christoph Kandler und Herrn M.Sc. Hao Luo möchte ich mich auch nochmal für die schöne Zeit als Büronachbarn bedanken. Für die Hilfestellung bei Organisatorischen Fragen und die jederzeit funktionierende IT-Infrastruktur gilt mein dank Frau Sabine Bay und Herrn Dipl.-Ing. Klaus Göbel.

Für die Korrektur meiner Arbeit möchte ich mich noch bei Frau Gudrun Owsianowski bedanken. Meinen Eltern Brigitte und Helmut Louen bin ich dankbar für die Ermöglichung des Studiums der Elektrotechnik.

Den mir wichtigsten Dank möchte ich an meine Frau Anne Louen richten, die mir stets mit ihrer Liebe, Geduld und Unterstützung ein großer Rückhalt gewesen ist und auf einen Teil unserer gemeinsamen Zeit verzichten musste. Ihr Einsatz hat entscheidend zu dem Gelingen der Arbeit beigetragen.

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	IX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Technik	3
1.2 Stand der Forschung	6
1.3 Motivation und Zielsetzung	8
1.4 Gliederung der Arbeit	10
<b>2 Problemformulierung</b>	<b>13</b>
2.1 Driftende Zustandsänderung	13
2.2 Aufbau einer datenbasierten Zustandsüberwachung	15
2.3 Anforderungen an eine datenbasierte Zustandsüberwachung	16
2.4 Anforderungen an eine Zustandsüberwachung im Fahrzeug	19
<b>3 Modellierung und Grundlagen des Anwendungsbeispiels</b>	<b>23</b>
3.1 Annahmen und Vereinfachungen	24
3.2 Situation vor dem Drei-Wege-Katalysator	25
3.3 Die Lambdasonden	27
3.3.1 Breitband-Lambdasonden	27
3.3.2 Sprung-Lambdasonde	28
3.4 Drei-Wege-Katalysator	30
3.4.1 Modellierung der chemischen Vorgänge	33
3.4.2 Modellierung der physikalischen Vorgänge	35
3.4.3 Alterung durch thermalen Stress	37
3.5 Bewertung des Modells am Schubtrieb und Katalysator-Ausräumen	38
3.6 Validierung	42
3.7 Zusammenfassung	43
<b>4 Merkmalsgenerierung für dynamische Betriebszustände</b>	<b>45</b>
4.1 Hybride Zustandsautomaten	46
4.2 Methode zur Merkmalsgenerierung	48
4.2.1 Aufbau	49
4.2.2 Realisierung	50
4.3 Simulationsstudie am Drei-Wege-Katalysator	51
4.4 Zusammenfassung	55
<b>5 Zwei-Klassen-Support Vector Machine basierte Fehlerdetektion</b>	<b>57</b>
5.1 Zwei-Klassen-Support Vector Maschine	59
5.2 Kernel-Trick	62
5.3 Fehlerdetektion-Zwei-Klassen-Support Vector Machine	64

5.4	Simulationsstudie am Drei-Wege-Katalysator . . . . .	66
5.5	Zusammenfassung . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Ein-Klassen-Support Vector Machine basierte Fehlerdetektion</b>	<b>69</b>
6.1	Ein-Klassen-Support Vector Maschine . . . . .	70
6.2	Fehlerdetektion-Ein-Klassen-Support Vector Maschine . . . . .	73
6.2.1	Platzierung des Ursprungs . . . . .	73
6.2.2	Nichtlineare Trennfläche . . . . .	76
6.3	Simulationsstudie am Drei-Wege-Katalysator . . . . .	77
6.4	Zusammenfassung . . . . .	79
<b>7</b>	<b>Support Vector Machine basierte Zustandsbestimmung</b>	<b>81</b>
7.1	Zustandsbestimmung mit einer Support Vector Maschine . . . . .	83
7.2	Simulationsstudie am Drei-Wege-Katalysator . . . . .	86
7.3	Zusammenfassung . . . . .	89
<b>8</b>	<b>Untersuchung der Drei-Wege-Katalysator-Zustandsüberwachung</b>	<b>91</b>
8.1	Aufbau der Experimente . . . . .	91
8.1.1	Fahrzeug I . . . . .	92
8.1.2	Fahrzeug II . . . . .	93
8.1.3	Fahrzeug III . . . . .	93
8.2	Untersuchung der Testfahrzeuge . . . . .	94
8.2.1	Generierung der Merkmale . . . . .	94
8.2.2	Fehlerdetektion . . . . .	96
8.2.3	Zustandsbestimmung . . . . .	100
8.3	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse . . . . .	102
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	103
9.2	Ausblick . . . . .	105
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>107</b>
A.1	Modellparameter . . . . .	107
A.2	Betrachtete Simulationen . . . . .	109
A.3	Lagrange Dualität . . . . .	110
A.4	Simulationsstudie . . . . .	111
A.5	Experimentelle Untersuchung eines Drei-Wege-Katalysators . . . . .	112
	<b>Literatur</b>	<b>115</b>

## Nomenklatur

Die folgende Nomenklatur führt in die verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen der vorliegenden Arbeit ein. Dabei folgt der gewählte Schriftsatz der DIN 1338. Dementsprechend werden skalare Größen durch normal gedruckte Zeichen dargestellt. Fett gedruckte kleine Buchstaben werden für Vektoren und fett gedruckte große Buchstaben für Matrizen verwendet. Kalligrafische Großbuchstaben kennzeichnen Mengen. Um eine bessere Lesbarkeit zu gewähren, wird die Zeitabhängigkeit von physikalischen Größen und Signalen oftmals weggelassen.

## Akronyme

Zeichen	Beschreibung
1K-SVM	Ein-Klassen- <i>Support Vector Machine</i>
2K-SVM	Zwei-Klassen- <i>Support Vector Machine</i>
DWK	Drei-Wege-Katalysator
EDL	Ende der nutzbaren Lebensdauer
FD-1K-SVM	Fehlerdetektion-Ein-Klassen- <i>Support Vector Machine</i>
FD-2K-SVM	Fehlerdetektion-Zwei-Klassen- <i>Support Vector Machine</i>
OB	<i>On-Board-Diagnose</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>

## Chemische Formelzeichen

Zeichen	Beschreibung
$\text{Ce}_2\text{O}_3$	Cer(III)-oxid
$\text{Ce}_2\text{O}_4$	Cer(IV)-oxid
CO	Kohlenstoffmonoxid
$\text{CO}_2$	Kohlenstoffdioxid
$\text{H}_2$	Wasserstoff
$\text{H}_2\text{O}$	Wasser
$\text{H}_a\text{C}_b$	Kohlenwasserstoffe
HC	Kohlenwasserstoff
$\text{N}_2$	Stickstoff
NO	Stickstoffmonoxid
$\text{NO}_x$	Stickoxide
$\text{O}_2$	Sauerstoff
$\rightarrow$	Reaktionspfeile
$\rightleftharpoons$	Gleichgewichtspfeile



## Symbole des Drei-Wege-Katalysators

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$A_r$	$\left[ \frac{1}{s} \right]$	Vorfaktor der Arrhenius-Gleichung von Reaktion $r$
$A_V$	$\left[ \frac{m^2}{m^3} \right]$	Spezifische Oberfläche pro Volumen des DWKs
$c_0$	$\left[ \frac{mol}{m^3} \right]$	Totale Abgaskonzentration
$c_{p,A}$	$\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$	Spezifische Wärmekapazität des Abgases
$c_{p,K}$	$\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$	Spezifische Wärmekapazität des DWKs
$c_{q,n}, c_{q,n}^k$	$[-]$	Konzentration der Abgaskomponenten $q$ in Zelle $n$ (korrigiert für das Sprung-Lambdasonde-Modell)
$c_{q,nK}$	$[-]$	Konzentration der Abgaskomponenten $q$ nach dem DWK
$c_{q,vK}$	$[-]$	Konzentration der Abgaskomponenten $q$ vor dem DWK
$psi$	$\left[ \frac{1}{in^2} \right]$	Zellendichte des DWKs
$C_{O_2}$	$\left[ \frac{mol}{m^3} \right]$	Sauerstoffspeicherkapazität des DWKs
$E_r$	$\left[ \frac{J}{mol} \right]$	Aktivierungsenergie der Arrhenius-Gleichung von Reaktion $r$
$f_q(\cdot)$	$[-]$	Funktion zur Berechnung der Konzentration von Abgaskomponente $q$ aus dem Luft-Kraftstoff-Gemisch vor dem DWK
$\Delta G_{r,n}$	$\left[ \frac{J}{mol} \right]$	Gibbs-Energie von Reaktion $r$ in Zelle $n$
$h_{q,i}$	$\left[ \frac{J}{mol} \right]$	Konstanten für die Näherung der Enthalpie von der Abgaskomponente $q$ mit $i = 1,2$
$H_{o,n}$	$\left[ \frac{J}{mol} \right]$	Enthalpie der Oberflächenkomponente $o$
$H_{q,n}$	$\left[ \frac{J}{mol} \right]$	Enthalpie der Abgaskomponente $q$
$\Delta H_{r,n}$	$\left[ \frac{J}{mol} \right]$	Enthalpieänderung der Reaktion $r$ in Zelle $n$
$I_p$	$[A]$	Pumpstrom einer Breitband-Lambdasonde
$k_{r,n}$	$[-]$	Reaktionskonstante der Reaktion $r$ in Zelle $n$
$K_{r,n}$	$[-]$	Gleichgewichtskonstante der Reaktion $r$ in Zelle $n$
$l_K$	$[m]$	Länge des DWKs
$L_i$	$\left[ V, \frac{1}{ppm} \right]$	Modell-Koeffizienten der Sprung-Lambdasonde mit $i = 1, \dots, 7$
$m_K$	$[kg]$	Masse des DWKs
$m_{KS}$	$[kg]$	Kraftstoffmasse für die Verbrennung
$m_L$	$[kg]$	Frischlufthmasse für die Verbrennung
$m_{O_2}$	$[kg]$	Sauerstoffmasse die der DWK speichern kann
$\dot{m}_A$	$\left[ \frac{kg}{s} \right]$	Abgasmassenstrom
$\dot{m}_L$	$\left[ \frac{kg}{s} \right]$	Frischlufthmassenstrom
$\bar{\dot{m}}_A$	$\left[ \frac{kg}{s} \right]$	Abgasmassenstrom (Mittelwert)
$M_A$	$\left[ \frac{kg}{mol} \right]$	Molare Masse des Abgases
$M_K$	$\left[ \frac{kg}{mol} \right]$	Molare Masse des DWKs
$M_{O_2}$	$\left[ \frac{kg}{mol} \right]$	Molare Masse des Sauerstoffs
$n_A$	$[-]$	Anzahl der Abgaskomponenten
$n_K$	$[-]$	Anzahl der DWK Oberflächenkomponenten
$n_Z$	$[-]$	Anzahl der Zellen im Modell

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$p_U$	[Pa]	Umgebungsluftdruck
$\dot{Q}_{A,n}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{s}}\right]$	Wärmestrom im Abgas in Zelle $n$
$\dot{Q}_{AK,n}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{s}}\right]$	Wärmestrom zwischen Abgas und DWK in Zelle $n$
$\dot{Q}_{R,n}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{s}}\right]$	Wärmestrom durch die exothermen Reaktionen in Zelle $n$
$r_K$	[m]	Radius des DWKs
$R$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right]$	Universelle Gaskonstante
$s_{q,i}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{mol}}\right]$	Konstanten für die Näherung der Entropie von der Abgaskomponente $q$ mit $i = 1,2,3$
$S_{o,n}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right]$	Entropie der Oberflächenkomponenten $o$ in Zelle $n$
$S_{q,n}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right]$	Entropie der Abgaskomponenten $q$ in Zelle $n$
$\Delta S_{r,n}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right]$	Entropieänderung der Reaktion $r$ in Zelle $n$
$\Delta t$	[s]	Dauer (Sauerstoff-Eintrag/-Austrag)
$T_{A,n}$	[K]	Abgastemperatur in Zelle $n$
$T_{K,n}$	[K]	DWK-Temperatur in Zelle $n$
$T_s$	[s]	Abtastzeit
$U_{n,\text{Sp}}, U_{n,\text{Sp}}^s$	[V]	Sprung-Lambdasonden-Spannung nach Zelle $n$ (stationär)
$U_{nK}$	[V]	Sprung-Lambdasonden-Spannung nach dem DWK
$U_{vK}$	[V]	Sprung-Lambdasonden-Spannung vor dem DWK
$\bar{U}_{vK}, \bar{U}_{vK}^n$	[V]	Mittelwert der Sprung-Lambdasonden-Spannung vor dem DWK (normiert)
$v_{r,n}$	$\left[\frac{1}{\text{s}}\right]$	Reaktionsgeschwindigkeit der Reaktion $r$ in Zelle $n$
$V_K$	[m <sup>3</sup> ]	Drei-Wege-Katalysator Volumen
$w_{\text{Sp}}$	[-]	Korrekturfaktor des Sprung-Lambdasonden-Modells
$\alpha$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right]$	Wärmeübergangskoeffizient
$\epsilon$	[-]	Kompressionsfaktor
$\theta_{o,n}$	[-]	Aufkommen von Oberflächenkomponente $o$ in Zelle $n$
$\bar{\theta}_{\text{Ce}_2\text{O}_4}$	[-]	Mittelwert des Aufkommens von Cer(IV)-oxid auf der Oberfläche über alle Zellen (Relative Sauerstoff Level)
$\vartheta_{A,nK}$	[°C]	Abgastemperatur nach dem DWK
$\vartheta_{A,vK}$	[°C]	Abgastemperatur vor dem DWK
$\lambda, \lambda_n$	[-]	Luft-Kraftstoff-Gemisch (in Zelle $n$ )
$\lambda_{n,\text{Br}}, \lambda_{n,\text{Br}}^s$	[-]	Gemessenes Luft-Kraftstoff-Gemisch der Breitband-Lambda-sonde nach Zelle $n$ (stationär)
$\lambda_{nK}$	[-]	Luft-Kraftstoff-Gemisch nach dem DWK
$\lambda_{nM}$	[-]	Luft-Kraftstoff-Gemisch nach dem Motor
$\lambda_{vK}, \lambda_{vK,\text{Br}}$	[-]	Luft-Kraftstoff-Gemisch vor dem DWK (Breitband-Lambda-sonde)
$\bar{\lambda}_{vK}, \bar{\lambda}_{vK}^n$	[-]	Mittelwert des Luft-Kraftstoff-Gemisch vor dem DWK (normiert)
$\nu_{r,o}$	[-]	Stöchiometrischer Koeffizient der Oberflächenkomponenten $o$ in Reaktion $r$

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\nu_{r,q}$	[-]	Stöchiometrischer Koeffizient der Abgaskomponenten $q$ in Reaktion $r$
$\tau_{Sp}, \tau_{Sp}^d$	[ms]	Zeitkonstante der Sprung-Lambdasonde (diskret)
$\tau_{Br}, \tau_{Br}^d$	[ms]	Zeitkonstante der Breitband-Lambdasonde (diskret)
$\tau_G^d$	[-]	Zeitkonstante der Gasdurchmischung (diskret)
$\tau_t^d$	[-]	Gastransport Totzeit (diskret)
$(\cdot)_n$	[-]	Nummer der Zelle $n = 0, \dots, n_z, \nu K = 0, nK = n_z$
$(\cdot)_o$	[-]	Indizes der Oberflächenkomponenten ( $Ce_2O_3, Ce_2O_4$ )
$(\cdot)_q$	[-]	Indizes der Abgaskomponenten ( $O_2, H_2, H_2O, CO, CO_2$ )
$(\cdot)_r$	[-]	Indizes der Reaktionen ( $O_2, H_2, CO$ )

### Mathematische und regelungstechnische Formelzeichen

Zeichen	Beschreibung
$a$	Parameter des Polynom-Kernels
$B_{Aus}, B_{Schub}, B_{Sonde}$	Bit (Anforderung Ausräumen/Schub, Sondenbereitschaft)
$\mathbf{c}, c$	Klasse der Merkmalsvektoren, des Merkmalsvektors
$\hat{\mathbf{c}}, \hat{c}$	Geschätzte Klasse der Merkmalsvektoren, des Merkmalsvektors
$d, d_{norm}$	SVM-Distanz (normiert)
$\mathbf{f}, f$	Fehlervektor, -größe
$\mathbf{g}_k(\cdot), \mathbf{g}_e(\cdot)$	Zustandsfunktion (zeit-/ereignisdiskret)
$g(\cdot), \mathbf{g}_{GB}(\cdot), \mathbf{g}_{UB}(\cdot)$	Optimierungsfunktion, Gleichungs-/ Ungleichungsbedingung
$\mathbf{g}_m(\cdot)$	Funktion zur Merkmalsgenerierung
$\mathbf{h}_k(\cdot), \mathbf{h}_e(\cdot)$	Ausgangsfunktion (zeit-/ereignisdiskret)
$k_k, k_e$	Abtastschritt, Ereignisschritt
$\mathbf{K}(\cdot, \cdot)$	Kernel-Funktion
$l$	Anzahl der Merkmale
$L(\cdot)$	Lagrange Problem
$\mathbf{m}, m, \mathbf{m}_{norm}, m_{norm}$	Merkmalsvektor,-größe (normiert)
$\max(\cdot), \min(\cdot)$	Maximum, Minimum
$n, n_t, n_{sv}$	Anzahl (Training, Stützvektoren)
$n_{FP}, n_{FN}, n_{RP}, n_{RN}$	Anzahl (falsch positiv bzw. negativ, richtig positiv bzw. negativ)
$p$	Ordnung des Polynoms
$P_{IUPR}, P_{FK}$	In Use Performance Ratio, Fehlklassifikationsrate
$q$	Zustand des Automaten
$\text{sgn}(\cdot)$	Signumfunktion
$t, \Delta t$	Zeit, Dauer
$\mathbf{u}_k, \mathbf{u}_e$	Eingangsvektor (zeit-/ereignisdiskret)
$\mathbf{v}_k, \mathbf{v}_e$	Eingangsvektor (Injektor/Quantisierer)
$\mathbf{w}, w$	Gewichtungsvektor, -faktor
$\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_e$	Zustandsvektor (zeit-/ereignisdiskret)
$\mathbf{y}_k, \mathbf{y}_e, y_k, y_e$	Ausgangsvektor, -größe (zeit-/ereignisdiskret)
$z, \Delta z$	Zustand (Zustandsänderung) einer Komponente
$\alpha, \alpha$	Lagrange Multiplikator (Vektor, Skalar)

Zeichen	Beschreibung
$\gamma$	Vergessensfaktor
$\zeta, \zeta$	Lagrange Multiplikator (Vektor, Skalar)
$\Theta$	Transition des Zustandsautomaten
$\Lambda(\cdot)$	Duale Lagrange Funktion
$\boldsymbol{\mu}, \mu$	Lagrange Multiplikator (Vektor, Skalar)
$\nu$	Parameter für max. Anteil an Ausreißern
$\xi, \xi$	Schlupfvariablenvektor, Schlupfvariable
$\rho$	Verschiebung der Hyperebene
$\sigma$	Standardabweichung
$\phi(\cdot)$	Merkmalsraum Transformation
$\bar{(\cdot)}$	Mittelwert
$(\cdot)^T$	Transponiert

### Formelzeichen der Mengenlehre

Zeichen	Beschreibung
$\mathcal{M}$	Menge der theoretisch möglichen Merkmalskombinationen
$\mathbb{N}$	Menge der natürlichen Zahlen
$\mathcal{Q}$	Menge der Zustände in einem Zustandsautomaten
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$\mathcal{SV}$	Menge der Indizes von den Stützvektoren
$\mathcal{SV}_0$	Menge der Indizes von den Stützvektoren ohne Ausreißer
$\mathcal{T}$	Menge der Indizes von den Merkmalsvektoren im Training
$\mathcal{Z}$	Menge der Merkmalskombination mit Zustandsänderung $\Delta z$
$\emptyset$	Leere Menge
$\in$	Element von
$\notin$	Kein Element von
$\forall$	Für alle Elemente
$ $	Bedingung
$\not\subseteq$	Keine Teilmenge
$\setminus$	Differenz von zwei Mengen
$\Delta$	Symmetrische Differenz von zwei Mengen
$\vee$	Disjunktion
$\wedge$	Konjunktion
$(\cdot)^-$	Indizes der negativen Klasse $c = -1$
$(\cdot)^+$	Indizes der positiven Klasse $c = 1$

# 1 Einleitung

Die Anforderungen an die Überwachung und Regelung von Kraftfahrzeugen steigen stetig und die Entwicklung wird hauptsächlich durch die schrittweise strenger werdenden Gesetzgebungen zur Reduktion der ausgestoßenen Emissionen vorangetrieben. Erstmals wurde ein entsprechendes Gesetz vor über 40 Jahren in Kalifornien erlassen und bis heute haben viele Länder mit eigenen Vorschriften oder durch Übernahme der Vorschriften anderer Länder nachgezogen (Feßler, 2011). Als besonders streng sind die Gesetzgebungen in Europa und in Kalifornien zu bewerten. Die Vorschriften für Fahrzeuge mit Ottomotor begrenzen den Ausstoß von schädlichen Abgaskomponenten wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und die Feinstaubpartikelmasse (EU, 2007).

Die Gesetzgebung begrenzt dabei nicht nur den Emissionsausstoß der Fahrzeuge, sondern verpflichtet seit einiger Zeit die Hersteller, alle emissionsrelevanten<sup>1</sup> Komponenten im Fahrzeug zu überwachen. Eine Fehlfunktion von einer solchen Komponente muss über die Motorkontrollleuchte an den Fahrer gemeldet werden. In Europa gibt es zum Beispiel seit 2000 eine entsprechende Bestimmung mit Einführung der europäischen *On-Board-Diagnose* (OBD) (EU, 1998). Damit soll die Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte im alltäglichen Betrieb sichergestellt werden (Reif und Dietsche, 2014). Hierzu gehört die elektrische und funktionelle Überwachung der emissionsrelevanten Komponenten. Mit der neusten europäischen Vorschrift wurde als neue Anforderung die Überwachung der Diagnosehäufigkeit von den OBD-Funktionen im Alltag durch die *In Use Performance Ratio*  $P_{IUPR}$  festgelegt und jeweils bestimmte Quoten für die mindestens zu erreichende Diagnosehäufigkeit vorgegeben. Die *In Use Performance Ratio* ist dabei definiert durch

$$P_{IUPR} = \frac{\text{Anzahl der Fahrzyklen mit Überwachungsergebnis}}{\text{Anzahl der Fahrzyklen}} \quad (1.1)$$

und für viele Überwachungen ist ein Wert von  $P_{IUPR} \geq 0,336$  festgesetzt (EU, 2008). Der Zähler für die Fahrzyklen wird immer dann hochgezählt, wenn unter anderem mindestens zehn Minuten seit dem Motorstart vergangen sind und mindestens fünf Minuten eine Geschwindigkeit von 40 km/h oder mehr erreicht wurde.

Zusätzlich zu den gesetzlichen Anforderungen kommen die Wünsche der Kunden nach stetig steigender Leistung, Komfort und Sicherheit bei gleichzeitiger Verbesserung der Verfügbarkeit und sinkenden Betriebskosten. Ein zu lösendes Problem dabei ist die dadurch ausgelöste wachsende Anzahl an Komponenten und die Zunahme der Systemkomplexität. Einhergehend mit der steigenden Anzahl an Komponenten sind eine steigende Ausfallwahrscheinlichkeit und steigende Betriebskosten. Eine Qualitätssteigerung der einzelnen Komponenten kann die Ausfallwahrscheinlichkeit senken, doch bei vielen Komponenten ist die Qualitätssteigerung aus wirtschaftlicher Sicht nicht möglich.

In modernen Fahrzeugen werden die Grenzwerte für den Emissionsausstoß durch den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen erreicht. Rein motorische Maßnahmen sind

<sup>1</sup> Unter emissionsrelevanten Komponenten werden alle Komponenten verstanden, durch deren Fehlfunktion der Emissionsausstoß steigen kann.