

Andreas Gienger

Ansätze zur Kombination modell- und datenbasierter Methoden für die Prozessüberwachung und Fehlerdiagnose

Band 61

**Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart**



Ansätze zur Kombination modell- und datenbasierter Methoden für die Prozessüberwachung und Fehlerdiagnose

Combining Model- and Data-based Methods for
Process Monitoring and Fault Diagnosis

Von der Fakultät
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Andreas Gienger

geboren in Kirchheim unter Teck

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Streif
Tag der mündlichen Prüfung: 15. September 2021

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2021

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 61

Andreas Gienger

**Ansätze zur Kombination modell- und
datenbasierter Methoden für die
Prozessüberwachung und Fehlerdiagnose**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8461-0

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart im Zeitraum von Juni 2016 bis April 2021. In dieser Zeit hatte ich die Möglichkeit, verschiedene spannende und vielseitige Projekte zu bearbeiten, deren Ergebnisse in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind. Wesentliche Inhalte dieser Arbeit sind im Sonderforschungsbereich 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ entstanden, welcher von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell gefördert wurde.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Oliver Sawodny für die Möglichkeit zur Mitarbeit und Promotion am Institut, das entgegengebrachte Vertrauen, die gewährten Freiheiten, die fachliche Betreuung sowie die Übernahme des Hauptberichts. Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Streif, Inhaber der Professur Regelungstechnik und Systemdynamik an der Technischen Universität Chemnitz, für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Für die bereitwillige Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche vom Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart.

Allen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die erlebnisreiche Zeit, den guten Zusammenhalt und die vielen interessanten Diskussionen am Institut. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen Dr.-Ing. Simon Alt und Dr.-Ing. Stefan Schaut für ihre Unterstützung in Form von zahlreichen fachlichen Diskussionen. Prof. Dr.-Ing. Cristina Tarín danke ich für die Möglichkeit zur Mitarbeit und die Betreuung im Sonderforschungsbereich 1244. In diesem Zusammenhang möchte ich auch Dr.-Ing. Michael Böhm, Spasena Dakova, Julia Heidingsfeld, Marius Oei und Dr.-Ing. Alexander Warsewa für die gute Zusammenarbeit danken. Darüber hinaus danke ich Stefanie Göltz, Dr.-Ing. Michael Ringkowski, Dr.-Ing. Kevin Schmidt und Jonas Stiefelmaier für hilfreiche Diskussionen über meine Arbeit.

Bei Gerlind Preisenhammer, Corina Hommel, Philipp Arnold, Joachim Endler und Sven Gutekunst bedanke ich mich für die vielfältige administrative und technische Unterstützung. Dr.-Ing. Eckhard Arnold und Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Dr. h.c. Michael Zeitz danke ich, weil Sie mir während meiner Zeit am Institut als Ansprechpartner stets zur Verfügung standen.

Nicht zuletzt gilt mein ausdrücklicher Dank meinen Eltern und meiner Familie, die durch ihre liebevolle Unterstützung und ihr Vertrauen zum erfolgreichen Abschluss meiner Promotion entscheidend beigetragen haben. Von ganzem Herzen danke ich dir, liebe Hana, und unserem Sohn Ben für euer Verständnis, eure Geduld und den bedingungslosen Rückhalt.

Stuttgart, im Dezember 2021

Andreas Gienger

Kurzfassung

Die Überwachung technischer Systeme spielt eine zentrale Rolle, um die Sicherheit, Funktionsfähigkeit und Gesamtanlageneffektivität in der Produktion zu garantieren. Dabei ergeben sich durch cyber-physikalische Systeme, einfach zu integrierende Sensoren wie auch durch steigende Datenmengen und Rechenkapazitäten verbesserte Möglichkeiten für die Prozessüberwachung komplexer Systeme. Neben dem klassischen Abgleich von Messwerten mit Grenzwerten umfasst die Prozessüberwachung die Detektion und Ursachenanalyse komplexer Fehler sowie die Überwachung qualitätsrelevanter Größen, welche nicht online erfasst werden. Hierfür existieren modell- und datenbasierte Methoden, deren Eigenschaften hinsichtlich Interpretierbarkeit, Applikationsaufwand, Wiederverwertbarkeit und Generalisierbarkeit im Allgemeinen gegensätzlich sind.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Ansätzen zur Kombination modell- und datenbasierter Methoden, um die Vorteile beider Ansätze zu nutzen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden bipartite Graphen betrachtet. Diese beschreiben die Faktorisierung des dynamischen Gesamtsystems und ermöglichen eine verteilte Prozessüberwachung sowie die Eingrenzung detektierter Fehler auf Teilsysteme. Die Struktur bipartiter Graphen ergibt sich durch physikalische Modelle, Expertenwissen oder datenbasierte Verfahren mit statistischen Zusammenhangsmaßen. Für die Parametrierung der Struktur werden physikalische Modelle wie auch latente Variablenmodelle in Form der probabilistischen Hauptkomponentenanalyse (PPCA) oder Gaußschen Mischmodellen (GMMs) verwendet. Die Quantifizierung der Detektierbarkeit und Unterscheidbarkeit von Fehlerfällen erfolgt über die Kullback-Leibler-Divergenz.

Die Ansätze werden auf verschiedene Problemstellungen der Prozessüberwachung angewendet und simulativ wie auch experimentell validiert. Die Beispielsysteme umfassen adaptive Hochhausstrukturen mit integrierten Aktoren und Sensoren sowie Vorbehandlungsanlagen, Zuluftanlagen und Trockner in Lackierereien. Am Beispiel der adaptiven Hochhausstruktur wird die Kombination aus modellbasierten Paritätsgleichungen und datenbasierter PPCA für die Fehlerdiagnose vorgestellt. Damit wird eine Identifikation und Entkopplung unbekannter, stochastischer Störeinflüsse im Residuenraum erreicht. Das Problem der Identifikation von Fehlerzuständen aus undokumentierten Messdaten wird für Vorbehandlungsanlagen untersucht, wofür GMMs und eine definierte Faktorisierung des Gesamtsystems genutzt werden. Zuluftanlagen dienen als Anwendungsbeispiel der Anomalieerkennung. Diese verwendet Daten einer aktiven Systemanregung, um die Faktorisierung des Gesamtsystems mithilfe der Transinformation abzuleiten und mit GMMs zu parametrieren. Am Beispiel von Aufheizkurven industrieller Trockner wird die Berechnung und Vorhersage qualitätsrelevanter Größen untersucht. Die Parametrierung der vordefinierten Faktorisierung des Gesamtsystems erfolgt mit GMMs. Für Letztere wird eine approximative analytische Beschreibung der Unsicherheitsfortpflanzung vorgestellt. Abschließendes Anwendungsbeispiel ist die Identifikation von Zusammenhängen zwischen Prozessgrößen und Qualitätsproblemen in der Lackiererei, wodurch eine Prädiktion von Qualitätsproblemen auf Anlagenebene erreicht wird.

Abstract

Technical systems, for example in production lines, have to be monitored in order to guarantee safety, functionality, and overall equipment effectiveness. Cyber-physical systems and easy-to-integrate sensor technologies as well as increasing data volumes and computing capacities provide promising possibilities to monitor complex systems. Going beyond the classical comparison of measured values with limit values, model- and data-based methods are capable of detecting and analyzing the root causes of complex faults. Furthermore, they are able to calculate quality-critical variables that are not recorded online. However, the properties of model- and data-based methods are opposite regarding interpretability, application effort, reusability, and generalizability.

This work proposes approaches to combine model- and data-based methods to exploit the advantages of both. Therefore, bipartite graphs are considered, which describe the factorization of the overall dynamical system and enable distributed process monitoring. Furthermore, detected faults can be isolated to subsystems. The structure of bipartite graphs is derived using physical models, expert knowledge, or data-based methods based on the mutual information. For parametrizing the structure, physical models as well as latent variable models in the form of probabilistic principal component analysis (PPCA) or Gaussian mixture models (GMMs) are used. The Kullback-Leibler divergence is used to quantify the detectability and distinguishability of faults.

The approaches are applied to various process monitoring problems and validated both through simulation and experimentally. The systems include adaptive high-rise structures with integrated actuators and sensors as well as pretreatment plants, air supply units and ovens in paint shops. The combination of model-based parity equations and data-based PPCA for fault diagnosis is presented using the adaptive high-rise structure as an example. This achieves the identification and decoupling of unknown stochastic disturbances in the residuals. The problem of identifying faults from unlabeled measurement data is investigated for pretreatment plants, for which GMMs and a predefined factorization of the overall system are used. Air supply units serve as an application example of anomaly detection. The factorization of the air supply unit is derived from data of an active system excitation using mutual information. The obtained factorization is parametrized by GMMs. The calculation and prediction of quality-critical variables are presented for heating curves in industrial ovens. The parametrization of the predefined factors is carried out with GMMs, for which an approximate analytical description of the uncertainty propagation is presented. The final application example is the identification of dependencies between process variables and quality problems in the paint shop. This allows a prediction of quality problems on a plant level.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Anforderungen	2
1.2	Literaturüberblick	4
1.3	Ziele und Struktur dieser Arbeit	15
1.3.1	Einführendes Beispielsystem	16
1.3.2	Zielsetzung	19
1.3.3	Wissenschaftlicher Neuheitswert	24
1.3.4	Struktur	25
2	Methodische Grundlagen	27
2.1	Systembeschreibung mithilfe bipartiter Graphen	29
2.2	Datengrundlage	31
2.2.1	Ein-/Ausgangsdaten	31
2.2.2	Datenauswahl	32
2.3	Bestimmung struktureller Zusammenhänge	32
2.3.1	Ableitung des Ein-/Ausgangsverhaltens mithilfe des Zustandsmodells	33
2.3.2	Expertenwissen zur Definition von Zusammenhängen	33
2.3.3	Stochastische Zusammenhangsmaße	35
2.4	Parametrierung von Zusammenhängen	39
2.4.1	Differentialalgebraische Gleichungen	39
2.4.2	Probabilistische Hauptkomponentenanalyse	39
2.4.3	Gaußsches Mischmodell	41
2.5	Detektierbarkeit und Unterscheidbarkeit von Fehlerfällen	44
2.5.1	Kullback-Leibler-Divergenz	45
2.5.2	Detektierbarkeit und Isolierbarkeit	45
3	Fehlerdiagnose unter unbekanntem stochastischen Störeinflüssen	47
3.1	Modellbasierte Residuengenerierung	48
3.1.1	Mathematisches Modell in Zustandsform	49
3.1.2	Paritätsgleichungen	49
3.1.3	Fehlerparametrierung	51
3.2	Datenbasierte Identifikation und Entkopplung latenter Variablen in Modellresiduen	51
3.2.1	Unsicherheitsbeschreibung mithilfe der Hauptkomponentenanalyse	52
3.2.2	Entkopplung von Unsicherheiten	53
3.3	Fehlerdetektion und -diagnose	54
3.3.1	Detektierbarkeit und Unterscheidbarkeit von Fehlerfällen	54
3.3.2	Dimensionalität der entkoppelten Residuen	55
3.3.3	Erkennung von Änderungen in den Residuen	56
3.3.4	Bayes Klassifikator	57

3.4	Beispielsystem adaptive Hochhausstruktur	57
3.4.1	Mechanische Struktur	60
3.4.2	Modalanalyse	60
3.4.3	Sensor- und Aktormodelle	61
3.4.4	Störmodelle	62
3.4.5	Zustandsmodell	64
3.5	Simulative Evaluation	65
3.5.1	Simulationsumgebung	65
3.5.2	Identifikation und Entkopplung von Störungen	67
3.5.3	Fehlerdiagnose	68
3.6	Bewertung des Ansatzes	76
4	Identifikation von Betriebs- und Fehlerzuständen	77
4.1	Bestimmung von Clustern	78
4.2	Unterscheidbarkeit von Clustern	78
4.3	Beispielsystem Vorbehandlungsanlage	79
4.4	Simulative Evaluation	80
4.4.1	Definition des Strukturgraphen	81
4.4.2	Bestimmung und Analyse der Cluster	82
4.4.3	Einfluss der Parameter	85
4.5	Experimentelle Validierung	88
4.5.1	Bestimmung und Analyse der Cluster	88
4.5.2	Einfluss der Parameter	92
4.6	Bewertung des Ansatzes	93
5	Anomalieerkennung	95
5.1	Aktive Systemanregung	96
5.2	Strukturidentifikation	98
5.3	Strukturparametrierung	100
5.4	Anomalieerkennung	101
5.4.1	Ähnlichkeitsmaß	101
5.4.2	Bestimmung der Anomalieschwelle	101
5.4.3	Ursachenanalyse von Anomalien	103
5.5	Beispielsystem Zuluftanlage	103
5.6	Simulative Evaluation	105
5.6.1	Strukturinformationen	105
5.6.2	Strukturparametrierung	107
5.6.3	Anomalieerkennung	108
5.6.4	Einfluss der Parameter	113
5.6.5	Einfluss der Trainingsdatenmenge und Vergleich zu zentralen Ansätzen	115
5.7	Experimentelle Validierung	116
5.7.1	Aktive Systemanregung	116
5.7.2	Strukturidentifikation	117

5.7.3	Strukturparametrierung	119
5.7.4	Anomalieerkennung	120
5.7.5	Einfluss der Parameter	124
5.7.6	Einfluss der Trainingsdatenmenge und Vergleich zu zentralen Ansätzen	125
5.8	Bewertung des Ansatzes	126
6	Berechnung und Vorhersage von Prozesswerten	127
6.1	Strukturparametrierung	128
6.2	Probabilistische Inferenz	129
6.2.1	Problembeschreibung	129
6.2.2	Mathematische Beschreibung mittels Gaußschen Mischmodellen . .	130
6.2.3	Berechnung und Vorhersage von Prozessgrößen	132
6.3	Beispielsystem industrieller Trockner	134
6.4	Experimentelle Validierung	136
6.4.1	Strukturinformationen	136
6.4.2	Strukturparametrierung	137
6.4.3	Berechnung von Temperaturverläufen	138
6.4.4	Berechnung unter Sensorfehlern und zeitliche Vorhersage der Tem- peraturverläufe	140
6.4.5	Einfluss der Parameter	142
6.5	Bewertung des Ansatzes	144
7	Identifikation von Qualitätszusammenhängen	145
7.1	Identifikation qualitätsrelevanter Merkmale und Prozessschritte	147
7.2	Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Qualitätsproblemen	149
7.3	Beispielsystem Lackiererei	150
7.4	Simulative Evaluation	152
7.4.1	Identifikation qualitätsrelevanter Merkmale und Prozessschritte . .	154
7.4.2	Verteilte Prädiktion von Qualitätsproblemen	157
7.4.3	Einfluss der Parameter	161
7.5	Bewertung des Ansatzes	162
8	Zusammenfassung und Ausblick	163
A	Modellierung, Identifikation und Regelung der verfahrenstechnischen Anlagen	167
A.1	Aufheizdynamik der Karosserie	168
A.2	Anlage zur Vorbehandlung und kathodischen Tauchlackierung	168
A.2.1	Modellierung	169
A.2.2	Störgrößen	171
A.2.3	Fehlerfälle	171
A.2.4	Parameteridentifikation	172
A.2.5	Regelung	172

A.3	Zuluftanlage	173
A.3.1	Modellierung	173
A.3.2	Störgrößen	176
A.3.3	Fehlerfälle	177
A.3.4	Parameteridentifikation	178
A.3.5	Regelung	178
A.4	Trockner	180
A.4.1	Modellierung	180
A.4.2	Störgrößen	182
A.4.3	Fehlerfälle	182
A.4.4	Parameteridentifikation	182
A.4.5	Regelung	183
A.5	Stochastische Qualitätszusammenhänge	183
A.5.1	Modellierung	184
A.5.2	Parametrierung	185
Abkürzungsverzeichnis		187
Symbolverzeichnis		189
Abbildungsverzeichnis		197
Tabellenverzeichnis		201
Literaturverzeichnis		203