

Roland Clauß

Funktions- und Reglersynthese auf der Basis lokaler Modellnetze



Springer Vieweg

Funktions- und Reglersynthese auf der Basis lokaler Modellnetze

Roland Clauß

Funktions- und Reglersynthese auf der Basis lokaler Modellnetze

 Springer Vieweg

Roland Clauß
Jüchen, Deutschland

Genehmigte Dissertation Bergischen Universität Wuppertal, 2020

ISBN 978-3-658-31983-0 ISBN 978-3-658-31984-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-31984-7>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Carina Reibold

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

für Sabrina

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als externer wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Automatisierungs- und Regelungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal und meiner parallelen Tätigkeit als Applikationsingenieur bei der Vaillant GmbH.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Tibken, danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit, diese Arbeit mit den nötigen Freiheiten unter seiner Betreuung zu erstellen. Vielen Dank für die tolle Unterstützung, den stets freundlichen Umgang auf Augenhöhe und die zahlreichen fachlichen Anregungen und Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann danke ich für seine fachliche und konstruktive Unterstützung, die freundliche Übernahme des Korreferats und insbesondere für seine kritische und sehr ausführliche Durchsicht der Arbeit.

Danken möchte ich auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl und bei Vaillant für den motivierenden Zuspruch, die Zusammenarbeit während der oftmals stressigen Projektphasen und den kollegialen Umgang miteinander. Gesondert möchte ich mich bei Herrn Dr. Thomas Pursche für die inspirierenden Diskussionen, Anregungen und die sehr umfangreiche Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern Bettina und Alfred Clauß sowie meinem Bruder Jürgen Clauß, die mich stets unterstützt und gefördert haben. Man kann sich kein besseres Elternhaus und keinen tolleren Bruder wünschen.

Und nicht zuletzt danke ich meiner Frau, besten Freundin und Liebe Sabrina Clauß, die in allen Lebenssituationen bedingungslos zu mir hält. Danke für dein Vertrauen, die Geduld und unglaubliche Unterstützung und dafür, dass du so eine liebevolle und wunderbare Mutter bist.

Erkrath
im Oktober 2020

Roland Clauß

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines Entwicklungsprojekts der Vaillant-Group. Ziel des Projekts war die Entwicklung einer Wärmepumpenplattform und damit die Entwicklung, Produktion und Vermarktung verschiedener Wärmepumpen in einem möglichst modularen und effizienten Konzept.

Bei einem Wärmepumpensystem handelt es sich um ein gekoppeltes nichtlineares Mehrgrößensystem, weshalb sich die Funktionsentwicklung als besonders komplex darstellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Methoden vorgestellt und entwickelt, um eine modellbasierte Funktionsentwicklung im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts realisieren zu können. Die größte Herausforderung bei einem modellbasierten Funktionsentwicklungsverfahren besteht in der Modellbildung. Es lassen sich insbesondere für nichtlineare Mehrgrößensysteme die äußerst komplexen physikalischen Zusammenhänge nur sehr schwer und nur mit hohem zeitlichem Aufwand modellieren. Daher werden in der vorliegenden Arbeit Verfahren vorgestellt, um über eine experimentelle Modellbildung hochqualitative Modelle für verschiedene nichtlineare Systeme effizient zu generieren. Dabei werden lokale Modellnetze als mathematische Struktur verwendet und mittels verschiedener Strukturoptimierungsverfahren basierend auf Messdaten optimiert. Im Rahmen der Modellbildung wird ein neuer Ansatz für eine aktive Versuchsplanung auf der Basis des *Hierarchical-Local-Model-Tree-For-Design-Of-Experiments*-Algorithmus vorgestellt und ein Ansatz für die dynamische Vermessung von Systemen entwickelt, der basierend auf dem *Local-Linear-Model-Tree*-Algorithmus die globale Stabilität eines lokalen Modellnetzes sicherstellt.

Die gebildeten Modelle werden im nächsten Schritt dazu genutzt, verschiedene Konzepte einer modellbasierten prädiktiven Regelung eines Wärmepumpensystems zu realisieren. Dabei wird zunächst die Struktur des geschlossenen

Regelkreises diskutiert und im nächsten Schritt die wesentlichen Möglichkeiten thematisiert, eine modellbasierte prädiktive Regelung zu parametrieren. Abschließend werden verschiedene Strategien entwickelt, ein Wärmepumpensystem unter Berücksichtigung von Systembeschränkungen zu regeln.

Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Validierung der vorgestellten und entwickelten Methoden anhand dreier unterschiedlicher realer Systeme. Zunächst wird die Identifikation der Anlagencharakteristik eines Brennwertheizgerätes vorgestellt. Nachfolgend wird eine modellbasierte prädiktive Regelung einer Wärmepumpe realisiert sowie ein Lüftungssystem dynamisch vermessen.

Abstract

The present work was created as part of a development project by the Vaillant Group. The aim of the project was the development of a heat pump platform and thus the development, production and marketing of various heat pumps in a concept that is as modular and efficient as possible.

A heat pump system is a coupled, non-linear multi-variable system, which is why the development of functions is particularly complex. Within the scope of the present work methods are presented and developed in order to be able to implement a model-based function development within the framework of a research and development project. The greatest challenge in a model-based function development process is the modeling. Particularly for non-linear multi-variable systems, the extremely complex physical relationships can only be modeled with great difficulty and only with great expenditure of time. Therefore, methods are presented in the present work to efficiently generate high-quality models for different nonlinear systems through experimental modeling. Local model networks are used as a mathematical structure and optimized using various structure optimization methods based on measurement data. As part of the modeling, a new approach for active test planning based on the *Hierarchical-Local-Model-Tree-For-Design-Of-Experiments* algorithm is presented and an approach for the dynamic identification of systems is developed, which is based on the *Local-Linear-Model-Tree* algorithm ensures the global stability of a local model network.

In the next step, the generated models are used to implement various concepts of a model-based predictive control of a heat pump system. First, the structure of the closed control loop is discussed and in the next step the main options for parameterizing a model-based predictive control are discussed. Finally, various

strategies are developed to regulate a heat pump system while taking system restrictions into account.

The work is concluded with a validation of the presented and developed methods using three different real systems. First, the identification of the system characteristics of a condensing boiler is presented. In the following, a model-based predictive control of a heat pump is implemented and a ventilation system is dynamically identified.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen und Stand der Technik	7
2.1	Heizungs- und Klimatechnik	8
2.2	Versuchsplanung	12
2.3	Lokale Modellnetze	25
2.4	Statistische Validierung approximierter Modelle	43
2.5	Stabilität eines lokalen Modellnetzes	46
2.6	Modellbasierte prädiktive Regler	49
3	Systemidentifikation	67
3.1	Identifikation statischer Systeme	68
3.2	Identifikation dynamischer Systeme	89
4	Reglersynthese basierend auf lokalen Modellnetzen	127
4.1	Regelkreisstruktur	128
4.2	Parametrierung im geschlossenen Regelkreis	137
4.3	Validierung der Regelungskonzepte	156
5	Anwendungsfelder in der Heizungs- und Klimatechnik	163
5.1	Identifikation einer Gasbrenner-Charakteristik	163
5.2	Modellprädiktive Vorlauf temperaturregelung eines Wärmepumpensystems	168
5.3	Identifikation eines zentralen Lüftungssystems	172

6 Zusammenfassung und Ausblick	177
Literaturverzeichnis	183

Verzeichnis aller Abkürzungen und Symbole

Es werden alle Abkürzungen und Symbole aufgelistet, welche nicht nur lokal verwendet werden.

Verwendete Abkürzungen

AIC	<i>Akaike Information Criterion</i> (Gütemaß)
APRBS	<i>Amplitude Modulated Pseudo Random Binary Signal</i> (Anregungssignal)
BMI	<i>Bilinear Matrix Inequalities</i> (bilineare Matrix Ungleichungen)
CARIMA	<i>Controlled Autoregressive Integrated Moving Average</i> (Systemstruktur)
CGPC	<i>Constrained Generalized Predictive Control</i> (modellbasierte prädiktive Regelung)
DGL	Differentialgleichungen
DOE	<i>Design Of Experiment</i> (statistische Versuchsplanung)
EEV	Elektrisches Expansionsventil
ENEV	Energieeinsparverordnung
FMU	<i>Functional Mock Up Unit</i> (c-code basierte Funktion)
GB	<i>Gigabyte</i>
GHz	Gigahertz
GPC	<i>Generalized Predictive Control</i> (modellbasierte prädiktive Regelung)
HILOMOT	<i>Hierarchical Local Model Tree</i> (Lernalgorithmus)

HILOMOTDOE	<i>Hierarchical Local Model Tree For Design Of Experiments</i> (aktiver Lernalgorithmus)
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> (Heizung, Lüftung, Klimatechnik)
JAZ	Jahresarbeitszahl
LLM	Lokale Lineare Modelle
LM	Lokale Modelle
LMI	<i>Linear Matrix Inequalities</i> (lineare Matrix Ungleichungen)
LMN	Lokale Modellnetze
LOLIMOT	<i>Local Linear Model Tree</i> (Lernalgorithmus)
LOOCV	<i>Leave One Out Cross Validation</i> (Gütemaß)
LS	<i>Least Squares</i> (Methode der kleinsten Fehlerquadrate)
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> (Mehrgrößensystem)
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i> (Mehrgrößensystem)
MLP	<i>Multi Layer Perceptron</i> (neuronales Netzwerk)
MPC	<i>Model Predictive Control</i> (modellbasierte prädiktive Regelung)
MPHC	<i>Model Predictive Heuristic Control</i> (modellbasierte prädiktive Regelung)
MPR	Modellbasierte Prädiktive Regelung
NTU	<i>Number Of Transfer Units</i> (Anzahl der Übertragungseinheiten)
NRBF	<i>Normalized Radial Basis Function</i> (neuronales Netzwerk)
NRMSE	<i>Normalized Root Mean Square Error</i> (Wurzelfunktion des normierten quadratischen Fehlers)
PRBS	<i>Pseudo Random Binary Signal</i> (Anregungssignal)
QG	<i>Quality Gate</i> (Meilenstein)
RBF	<i>Radial Basis Function</i> (neuronales Netzwerk)
RAM	<i>Random-Access Memory</i> (Direktzugriffsspeicher)
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (Wurzelfunktion des quadratischen Fehlers)
SIL	<i>Software in the Loop</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i> (Eingößensystem)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

Regelungstechnische Symbole

$d[k]$	Störgröße
$e[k]$	Regelabweichung
$r[k]$	Referenztrajektorie
$u[k]$	Systemeingang, Stellgröße
$w[k]$	Führungsgröße
$x[k]$	Systemzustand
$y[k]$	Systemausgang, Regelgröße
$\hat{y}[k]$	Modellausgang
$z[k]$	Ersatzvektor
A	Systemmatrix, Polynomial Matrix der Ausgänge
B	Polynomial Matrix der Eingänge
C	Polynomial Matrix des Rauschens
K	Verstärkungsfaktor
N_1	Untere Grenze des Prädiktionshorizonts des Ausgangs
N_2	Obere Grenze des Prädiktionshorizonts des Ausgangs
N_u	Prädiktionshorizont des Eingangs
P	Lyapunov-Matrix
Q	Gewichtungsmatrix der Ausgänge
R	Gewichtungsmatrix der Eingänge
V	Lyapunov-Funktion
$\xi[k]$	Rauschterm

Allgemeine Symbole

a	Polynomkoeffizient des Ausgangs
b	Polynomkoeffizient des Eingangs
c	Konstante, Zentrum
k_σ	Proportionalitätsfaktor
m	Anzahl der Eingänge
n	Anzahl der Ausgänge
n_a	Ordnung des Ausgangspolynoms
n_b	Ordnung des Eingangspolynoms

n_g	Ordnung des Gesamtpolynoms
r	Radius
r_{yy}	Autokorrelationsfunktion
I	Intervall
J	Kostenfunktional
M	Modellanzahl
N	Menge an Datenpunkten
S_{yy}	Autoleistungsdichtespektrum
T	Zeitkonstante, Temperatur
X	Regressionsmatrix
Y	Menge an Tschebyscheff-Punkten
α	Unsicherheit
δ	Ausdehnung
θ	Parametervektor
κ	Parameter der Teilungsfunktion
λ	Eigenwert
μ	Zugehörigkeitsfunktion
σ	Standardabweichung
σ_n	Standardabweichung des Rauschens
τ	Zeitverschiebung
ω	Polynomkoeffizient
ω_F	Kreisfrequenz
Φ	Gewichtungsfunktion
Ψ	Teilungsfunktion

Physikalische Symbole

c_p	spezifische Wärmekapazität
k	Wärmedurchgangskoeffizient
\dot{m}	Massenstrom
p	Druck
w_m	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit
x_{EEV}	Position des elektrischen Expansionsventils

P	Elektrische Leistung
\dot{Q}	Thermische Leistung
\dot{W}	Wärmekapazitätsstrom
ν	Kinematische Viskosität
ρ	Dichte

Mathematische Symbole

$\hat{\cdot}$	Geschätzter Wert
$ \cdot $	Betrag einer Zahl
$\ \cdot\ ^2$	2-Norm
$(\cdot)^T$	Transponierte einer Matrix
$(\cdot k)$	Prädiktion vom Zeitpunkt k aus
$\text{diag}(\cdot)$	Diagonalelemente einer Matrix
$\det(\cdot)$	Determinante einer Matrix
$\text{cov}(\cdot)$	Kovarianzmatrix
$\text{conv}\{\cdot\}$	Konvexe Menge
$E\{\cdot\}$	Erwartungswert
$\mathcal{L}(\cdot)$	Likelihood-Funktion
$\min(\cdot)$	Minimum
$\max(\cdot)$	Maximum
$\underline{\cdot}$	untere Schranke
$\bar{\cdot}$	obere Schranke, arithmetischer Mittelwert
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen



1.1 Motivation

Moderne Funktionsentwicklungsverfahren basieren in nahezu allen Fällen auf Modellen. Diese Modelle bilden die realen Geräte oder Systeme ab und dienen in erster Linie als simulative Grundlage, um Funktionen unabhängig vom realen System rechnergestützt zu entwickeln. Die hergeleiteten Systemeigenschaften können zusätzlich in die Funktionen integriert werden. Für nichtlineare gekoppelte Mehrgrößensysteme sind modellbasierte Funktionsansätze häufig die einzige Möglichkeit, bestimmte Problemstellungen zu lösen, da die funktionalen Abhängigkeiten der Ein- und Ausgänge des Systems implizit im Modell berücksichtigt werden.

Die Modellbildung ist in diesem Kontext ein wichtiger Arbeitsschritt und die Grundlage für eine erfolgreiche modellbasierte Funktionsentwicklung. Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen den folgenden drei Ansätzen der Modellbildung:

- White-Box-Modellierung
- Black-Box-Modellierung
- Grey-Box-Modellierung

Während bei der sogenannten White-Box-Modellierungsmethode die physikalischen Zusammenhänge und Abhängigkeiten in eine mathematische Beschreibung überführt werden, wird beim Black-Box-Ansatz konträr dazu das Modell basierend auf Messdaten über mathematische Optimierungsalgorithmen approximiert. Die Grey-Box-Methode koppelt die beiden gegensätzlichen Methoden. Es entsteht somit ein physikalisch hergeleitetes Modell, bei dem besonders komplexe physikalische Zusammenhänge mittels Messdaten approximiert sind. Für eine erfolgreiche modellbasierte Funktionsentwicklung müssen alle drei Methoden entsprechend den

Anwendungsfällen und den Anforderungen an das jeweilige Modell berücksichtigt werden. Die Modellqualität und der zeitliche Aufwand für die Modellbildung sind hierbei die wesentlichen Einflussfaktoren.

Basierend auf den identifizierten Modellen können Funktionen im Bereich der höheren Mess- und Regelungstechnik entwickelt werden, die auch komplexe nicht-lineare Mehrgrößen-Aufgaben effizient mit einer hohen Genauigkeit und Robustheit lösen können. Durch eine geeignete Kopplung der Systemidentifikation mit der Funktionsentwicklung können die notwendigen Schnittstellen und Strukturen bereitgestellt werden, um eine modellbasierte Funktionsentwicklung effizient zu gestalten. Wichtige Disziplinen einer Funktions- bzw. Reglerentwicklung sind die folgenden:

- Stabilitätsanalyse
- Parameteroptimierung
- Validierung

Insbesondere die Stabilitätsanalyse nichtlinearer Mehrgrößensystem erweist sich häufig als besonders schwierig, ist jedoch entscheidend für die passende Wahl und Auslegung eines geeigneten Regelungskonzepts. Für eine optimale Parametrierung müssen Strategien entwickelt werden, um beispielsweise zunächst die entwickelten Funktionen simulativ auszulegen und zu parametrieren. Anschließend werden diese dann in einem darauffolgenden Schritt an der realen Anlage validiert, um ein robustes Verhalten der Funktionen sicherzustellen. Die Validierung der Konzepte finalisiert den Entwicklungsprozess, sodass die entwickelten Funktionen mit einer hohen Qualität und Robustheit im Feld eingesetzt werden können.

Im Bereich der Heizungs- und Klimatechnik werden modellbasierte Funktionsentwicklungsverfahren immer häufiger angewendet, da sich die Anforderungen bezüglich Effizienz und Entwicklungsaufwand der Anlagen erhöhen. Eine große Hürde ist jedoch oftmals die Komplexität modellbasierter Verfahren und die damit einhergehenden hohen Entwicklungskosten. Gleichzeitig werden die zeitlichen Anforderungen an ein Entwicklungsprojekt größer, sodass entsprechend moderne Heizungssysteme in kürzester Zeit mit einem minimalen Ressourcenaufwand realisiert werden müssen. Es entstehen dementsprechend Kompromisslösungen bei der Entwicklung von Funktionen, und modellbasierte Ansätze werden oftmals bereits in der Planungsphase von Projekten verworfen. Zudem schreitet die Digitalisierung in dieser Branche und damit einhergehend der Bedarf an intelligenten Systemkonzepten weiter voran. Stromgeführte Systeme gewinnen immer mehr an Bedeutung, sodass beispielsweise Brennwertheizgeräte insbesondere im Neubausegment als primärer Wärmeerzeuger von Wärmepumpen- oder Luftheizungssystemen abgelöst

werden. Eine höhere Konnektivität des Systems wird gefordert, um die gesamte Gebäudetechnik möglichst effizient miteinander zu vernetzen. Durch diese Integration können verschiedene Systemkomponenten miteinander interagieren, wenn bereits während der Entwicklungsphase entsprechende Funktionalitäten in einem Systemkontext entwickelt werden. Ein weiteres wichtiges Entwicklungsfeld sind selbstoptimierende bzw. -lernende Verfahren. Auch in der Gebäudetechnik werden in der Zukunft Funktionen und Verfahren eingesetzt, die das Nutzerverhalten bereits während des Betriebs interpretieren und sich auf dieser Basis selbst optimieren. Mit anderen Worten: Auch in der Gebäude- und Heizungstechnik schreitet die Digitalisierung mit großer Geschwindigkeit voran.

Die Motivation bzw. Intention für die vorliegende Arbeit lässt sich aus dem bisher beschriebenen Kontext direkt ableiten: Es wird ein Gesamtkonzept im Bereich Heizungs- und Klimatechnik erarbeitet, das mit Hilfe einer effizienten Modellbildungsstrategie eine modellbasierte Funktionsentwicklung in einem Projektumfeld realisierbar gestaltet. Diese Zielsetzung wird im Folgenden konkretisiert und darauf basierend die Struktur der Arbeit vorgestellt.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Ausarbeitung eines Konzepts zur modellbasierten Funktionsentwicklung. Das Konzept wird im Hinblick auf eine adäquate Realisierbarkeit im Umfeld eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts konzipiert, das wiederum mit Hilfe des sogenannten Forschungs- und Entwicklungscontrollings (F&E-Controlling) strukturiert wird. Die wesentlichen Phasen eines F&E-Controllings sind in Abbildung 1.1 vereinfacht dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert.

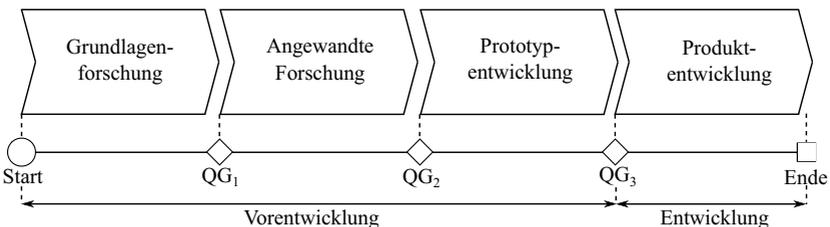


Abb. 1.1 Phasen des F&E-Controlling nach [FMS19]