

# **Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme**

Band 40

Andreas Pfeffer

## **Modelling, Estimation and Control Concepts for Pneumatic Systems**

Schriften aus den Instituten für

Automatisierungs- und Regelungstechnik (TU Wien)  
Regelungstechnik und Prozessautomatisierung (JKU Linz)

Herausgeber: Andreas Kugi und Kurt Schlacher

Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme

Band 40

**Andreas Pfeffer**

**Modelling, Estimation and Control Concepts  
for Pneumatic Systems**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Wien, TU, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6002-7

ISSN 1866-2242

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

*Für meine Lieben*



---

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) der Technischen Universität Wien unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kugi. Die beiden Teile der Arbeit wurden jeweils von einem Industriepartner finanziell unterstützt bzw. ausfinanziert. Diese Arbeit wurde in einer ähnlichen Form an der technischen Universität Wien als Dissertation eingereicht und im Jänner 2018 erfolgreich verteidigt.

Der erste Teil der Arbeit, der sich Untersuchungen zu hydropneumatischen Speichern widmet, resultiert aus einer Zusammenarbeit mit der zentralen Forschung der Robert Bosch GmbH Deutschland. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank den Mitarbeitern der Gruppe CR/AEH3 um den Projektleiter Dr. Daniel Seiler-Thull, mit welchen die Kooperation stattfand. Insbesondere ist hier Dr. Adrian Trachte hervorzuheben, der als direkter Ansprechpartner stets Hilfestellungen anbot und fachlichen Austausch ermöglichte.

Der zweite Teil dokumentiert Ergebnisse aus einem Projekt zur Bewegungssteuerung pneumatischer Linearaktoren, welches im Rahmen des Festo-Systemlabors, einer Forschungsk Kooperation der Festo AG & CO. KG und des Instituts für Automatisierungs- und Regelungstechnik, entstand. Insbesondere ist hier die Eigentümerfamilie Stoll hervorzuheben, die dieses Systemlabor initiiert, finanziert und sich auch persönlich um den Stand der Projekte in Wien informiert hat.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kugi, welcher das Entstehen dieser Arbeit in der vorliegenden Form erst ermöglicht hat. Danke lieber Andi für deine vielen Ratschläge und Hilfestellungen, sowie das Vorleben einer steten Strebsamkeit nach Lösungen und einer unermüdlichen Arbeitsbereitschaft. Weiters möchte ich jenen Danken, die mich bei den einzelnen Projekten unterstützt bzw. an den Publikationen als Mitautoren Ihren Beitrag geleistet haben. Ein Dank gebührt auch allen Kolleginnen und Kollegen, die stets für einen Gedankenaustausch sowie für gemeinsame private Aktivitäten zu haben waren und sind. Im Speziellen möchte ich an dieser Stelle

Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Böck einen ganz besonderen Dank aussprechen.

An dieser Stelle möchte ich auch Univ.-Prof. Dr. Steven Liu von der Technischen Universität Kaiserslautern für die Verfassung des Erstgutachtens und für die Übernahme der Funktion eines Prüfers danken. Weiters möchte ich Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Wolfgang Kemmettmüller für die Erstellung des Zweitgutachtens danken. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes gilt mein Dank Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Gottfried Strasser.

Zu guter Letzt gilt mein Dank auch meiner Familie, die mir immer den notwendigen Rückhalt und auch die Freiräume für die Vollendung dieser Arbeit gegeben hat.

Wien, im Mai 2018

Andreas Pfeffer

---

## Abstract

---

Pressurized gases are widely used as energy sources in various fields of applications. In this work, two typical tasks for different industrial fields are investigated in the two parts of this thesis. The first task concerns the automotive industry, which is faced with the challenge to meet stricter exhaust emission standards and thus to reduce fuel consumption. To this end, a number of different concepts have been presented in the past. One, which is already in use for heavy duty vehicles, is the hydraulic hybrid drive. In this approach, a gas charged hydraulic accumulator is utilized as energy storage. This so-called hydropneumatic accumulator is a key element for the hybrid drive and constitutes the centre of interest in the first part of this thesis. The second part deals with pneumatic linear drives, where pressurized air represents the power source. The increasing demand for flexible and robust low-cost solutions, requires new approaches for the motion control task of pneumatic drives. To this end, a new control solution for point-to-point movements of pneumatic linear drives is developed.

In the first part of this thesis, the mathematical model of a hydraulic accumulator is derived. For the control of hybrid drives, the actual amount of energy stored in the accumulator, also referred to as state of charge, is an indispensable information. Unfortunately, the state of charge cannot be easily measured. Therefore, two tailored estimation strategies are developed. The first approach is an Extended Kalman Filter. It is based on a simplified model of the accumulator, which results in a system of differential algebraic equations. Beside the state of charge, it also allows to estimate the gas mass inside the accumulator. This is crucial for fault detection because the efficiency of the hybrid drive dramatically decreases when the gas side of the accumulator exhibits leakages. The second estimation approach focuses on the combination of the available sensor information, without utilizing a detailed mathematical model of the accumulator. It only requires the gas behaviour and the sensor dynamics. The resulting estimator features low computational costs and is therefore best suited for series productions.

The derived models and estimation concepts are validated by measurements from a road test drive with a prototype of the hydraulic hybrid drive. In particular,

also the influence of different spatial discretizations of the accumulator housing is examined. It is also shown that the two estimation concepts outperform state-of-the-art approaches from literature, in particular those which rely on the assumption of an ideal gas.

The second part of this thesis aims at designing robust and highly flexible, but cost-efficient solutions for point-to-point motions of pneumatic cylinders, which are one of the most common applications in pneumatics. The main challenges in this application are varying working conditions over the lifetime of the drive. This includes variations in the supply pressure, the moving mass and the friction of the system. In order to be accepted by industry, beside these technical requirements, new solutions must decrease the total costs (investment and maintenance costs) over the lifetime in comparison to classical concepts. In a first step, a sensor and actuator concept is proposed. The sensor concept differs from standard (e.g. servo-control) solutions in that the piston position is only measured by low-cost sensors near the two stroke-ends of the cylinder. For the actuation of the linear drive, switching valves are chosen, which operate leakage-free. In a second step, a tailored control concept is developed for the piston movements without full-stroke position information. For this, different nonlinear control and estimation concepts are combined to ensure high robustness. The core is a flatness-based feedforward controller for the piston position in combination with a pressure control. Depending on the application, two different solutions for the motion control inside the position measurement ranges are presented. The first one aims at low-cost applications by utilizing a simple compliance control. The controller mimics the behaviour of mechanical damping elements and can be easily adjusted online by service technicians. Furthermore, this solution also allows to apply a desired stiffness at the stroke-end. The second more sophisticated solution utilizes a combined position and pressure control. To this end, an appropriate trajectory planning strategy is designed. Because the motion ends at the hard stroke-ends of the drive, the planning strategy must guarantee that the desired trajectory does not contain an overshoot. To further increase the flexibility of the control concept, a new estimation concept is derived. It is based on a recursive least-squares algorithm extended by a projection approach which ensures that the estimated parameters stay within the admissible range. Two of these algorithms are combined to a master-slave scheme to be able to simultaneously perform a fast adaptation to changing working conditions and to guarantee sufficient robustness to noisy signals.

The individual algorithms and the overall control concepts are validated by measurements from various scenarios at two different lab test benches. The ability to reject supply pressure drops in a wide pressure range without any adaptations is demonstrated. The overall performance is very good, in particular with respect to the robustness against changing working conditions, like different moving masses, varying friction and different pipe lengths between the valves and the cylinder.

---

## Kurzzusammenfassung

---

Die Kompressibilität von Gasen wird in vielen industriellen Anwendungen genutzt um Energie zu speichern. In den beiden Teilen dieser Arbeit werden zwei typische Anwendungen unterschiedlicher Industriefelder betrachtet. Der erste Teil der Arbeit behandelt eine Anwendung aus der Automobilindustrie. Diese ist mit der Herausforderung konfrontiert, stetig steigenden Anforderungen bei Abgasvorschriften und somit Verbrauchsreduktionen zu genügen. Dafür wurden in der Vergangenheit verschiedene Konzepte, wie der aus Schwerfahrzeugen bekannte hydraulische Hybridantrieb, vorgestellt. Ein Schlüsselement ist dabei ein komprimierbares Gasvolumen in einem hydropneumatischen Akkumulator. Dieser Energiespeicher steht im Mittelpunkt des ersten Teils der Arbeit. Der zweite Teil der Arbeit behandelt pneumatische Linearantriebe, welche die potentielle Energie komprimierter Luft als Energiequelle nutzen. Steigender Bedarf für flexible, robuste und gleichzeitig kostengünstige Lösungen verlangt neue Ansätze für die Bewegungssteuerung von pneumatischen Linearantrieben. Zu diesem Zweck werden neue Lösungen für Punkt-zu-Punkt Bewegungen vorgestellt.

Im ersten Teil der Arbeit wird ein mathematisches Modell des hydropneumatischen Speichers abgeleitet. Für die Regelung von Hybridantrieben ist die aktuell gespeicherte Energiemenge, der sogenannte Speicherzustand, unabdingbar. Für diesen werden zwei Schätzstrategien erarbeitet, um eine aufwändige direkte Messung einzusparen. Erstens ein Extended Kalman Filter auf Basis eines vereinfachten Modells des Speichers, welches zu einem differential-algebraischen System führt. Das Extended Kalman Filter ermöglicht neben dem Speicherzustand auch eine Schätzung der Gasmasse. Dies ist für Fehleranalysen wichtig, da Gasleckagen im Speicher die Gesamteffizienz des Hybridantriebs stark reduzieren. Zweitens eine Speicherzustandsschätzung ohne komplexe mathematische Modelle, lediglich mithilfe der verfügbaren Sensorinformationen. Notwendig sind nur die Realgasgleichung und die Dynamik der Sensoren. Dieser Schätzalgorithmus benötigt nur geringe Rechenkapazität und ist daher bestens für Serienfahrzeuge geeignet.

Die entwickelten Modelle und Schätzkonzepte sind mittels Messdaten einer Testfahrt eines Prototypen des hydraulischen Hybridantriebs validiert.

Untersucht wird insbesondere der Einfluss der Diskretisierung des Speichergehäuses. Weiters wird gezeigt, dass beide Schätzkonzepte klassische Ansätze aus der Literatur basierend auf idealen Gasen hinsichtlich der Genauigkeit übertreffen.

Der zweite Teil dieser Arbeit zielt auf robuste, sehr flexible aber dennoch kostengünstige Lösungen für Punkt-zu-Punkt Bewegungen ab. Diese stellen eine der häufigsten Anwendungen in der Industriepneumatik dar. Die größten Herausforderungen dabei sind sich ändernde Betriebsbedingungen über die Lebensdauer des Antriebs. Davon sind vor allem der Versorgungsdruck, die bewegte Masse und die Reibung des Systems betroffen. Um in der Industrie zur Anwendung zu gelangen, müssen neue Lösungsansätze neben diesen technischen Bedingungen auch geringere Gesamtkosten (Investitionskosten und laufende Kosten über die Produktlebensdauer) als klassische Lösungen aufweisen. Zu Beginn wird ein Sensor- und Aktuatorkonzept vorgestellt. Dieses unterscheidet sich von heutigen Standardlösungen (z.B. Servoregelung) durch seine kostengünstige, jedoch nur abschnittsweise im Bereich der Endlagen vorhandene, Positionssensorik. Die Ansteuerung des Pneumatikzylinders erfolgt über vier leakagefreie Schnellschaltventile. Für dieses System wird ein maßgeschneidertes Regelungskonzept für den Pneumatikzylinder mit abschnittsweiser Positionsmessung entwickelt. Kern dieses Konzepts ist eine flachheitsbasierte Vorsteuerung kombiniert mit einer Kammerdruckregelung. Für verschiedene Zielanwendungen werden zwei erweiterte Konzepte für die Bewegung innerhalb der Positionsmessbereiche vorgestellt. Dabei werden für erhöhte Robustheit unterschiedliche Schätz- und Regelungsalgorithmen kombiniert. Das erste zielt auf besonders kostensensitive Anwendungen ab und beinhaltet eine einfache Nachgiebigkeitsregelung. Diese imitiert die, heute meist mechanisch ausgeführten, Dämpfungselemente, kann jedoch elektronisch im Betrieb eingestellt werden. Zusätzlich kann eine gewünschte Steifigkeit am Endanschlag eingepreßt werden. Im zweiten rechenaufwändigeren Konzept wird eine Mehrgrößenregelung für die Position und einen Druck verwendet. Dafür wurde eine geeignete Trajektorienplanung entwickelt. Diese muss Überschwingen inhärent vermeiden, da die Bewegung des Kolbens direkt am harten Endanschlag endet. Zur Steigerung der Flexibilität dieses Konzepts wird eine Schätzstrategie entwickelt. Diese basiert auf Algorithmen der rekursiven Verfahren der kleinsten Quadrate, welche um eine Projektion erweitert werden. Die Projektion stellt geschätzte Parameter innerhalb der zulässigen Grenzen sicher. Zwei dieser Schätzalgorithmen werden zu einem Master-Slave Konzept kombiniert, welches schnelle Anpassungen an sich ändernde Betriebsbedingungen und zugleich Robustheit gegenüber Rauschen ermöglicht.

Die einzelnen Algorithmen sowie die übergeordneten Regelungskonzepte werden in verschiedenen Szenarien durch Messungen an zwei Laboraufbauten validiert. Dabei wird gezeigt, dass die Konzepte Einbrüche im Versorgungsdruck in weiten Druckbereichen ohne zusätzliche Adaptierungen ausgleichen können. Die Regelgüte ist sehr gut, besonders im Hinblick auf Robustheit gegenüber sich ändernden Betriebsbedingungen, wie Variationen in der bewegten Masse, der Reibung oder auch der Schlauchlängen zwischen den Ventilen und dem Zylinder.

---

# Contents

---

|                                                                                               |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Nomenclature</b>                                                                           | <b>xi</b>     |
| <b>1 Introduction</b>                                                                         | <b>1</b>      |
| 1.1 Part I: Modelling and Estimator Design for a Gas Charged Hydraulic Accumulator . . . . .  | 2             |
| 1.2 Part II: Modelling, Estimator and Controller Design for Pneumatic Linear Drives . . . . . | 3             |
| <br><b>I Modelling and Estimator Design for a Gas Charged Hydraulic Accumulator</b>           | <br><b>5</b>  |
| <b>2 Preliminaries</b>                                                                        | <b>7</b>      |
| <b>3 Mathematical Modelling</b>                                                               | <b>11</b>     |
| 3.1 Piston and Sealing End . . . . .                                                          | 12            |
| 3.2 Carbon Fibre Reinforced Plastic Pipe . . . . .                                            | 13            |
| 3.2.1 Carbon Fibre Reinforced Plastic Pipe - <i>Model I</i> . . . . .                         | 15            |
| 3.2.2 Carbon Fibre Reinforced Plastic Pipe - <i>Models II and III</i> .                       | 18            |
| 3.3 Gas Chamber . . . . .                                                                     | 18            |
| 3.4 Oil Chamber . . . . .                                                                     | 20            |
| 3.5 Overall Model Structure . . . . .                                                         | 21            |
| <br><b>4 Model Validation</b>                                                                 | <br><b>23</b> |
| 4.1 Sensor Dynamics . . . . .                                                                 | 23            |
| 4.2 Validation . . . . .                                                                      | 24            |
| <br><b>5 Estimator Design</b>                                                                 | <br><b>33</b> |
| 5.1 Extended Kalman Filter . . . . .                                                          | 35            |
| 5.2 Signal-based Estimator . . . . .                                                          | 39            |

|           |                                                                               |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6</b>  | <b>Estimator Validation</b>                                                   | <b>43</b>  |
| <b>7</b>  | <b>Conclusions and Outlook</b>                                                | <b>55</b>  |
| <b>II</b> | <b>Modelling, Estimator and Controller Design for Pneumatic Linear Drives</b> | <b>59</b>  |
| <b>8</b>  | <b>Preliminaries</b>                                                          | <b>61</b>  |
| <b>9</b>  | <b>Mathematical Modelling</b>                                                 | <b>69</b>  |
| 9.1       | Mathematical Representation of the Pneumatic Drive . . . . .                  | 70         |
| 9.2       | Reduced Model . . . . .                                                       | 72         |
| 9.3       | Average Model . . . . .                                                       | 74         |
| <b>10</b> | <b>Controller Design</b>                                                      | <b>77</b>  |
| 10.1      | Flatness-based Parametrization . . . . .                                      | 79         |
| 10.2      | Combined Position and Pressure Control . . . . .                              | 81         |
| 10.3      | Pressure Control . . . . .                                                    | 81         |
| 10.4      | Compliance Control . . . . .                                                  | 82         |
| <b>11</b> | <b>Estimator Design</b>                                                       | <b>83</b>  |
| 11.1      | Problem Formulation . . . . .                                                 | 85         |
| 11.2      | Constrained Recursive Least-Squares Algorithm . . . . .                       | 85         |
| 11.3      | Master-Slave Estimation Scheme . . . . .                                      | 87         |
| <b>12</b> | <b>Endpoint-to-Endpoint Movements</b>                                         | <b>89</b>  |
| 12.1      | Control Concept . . . . .                                                     | 90         |
| 12.1.1    | Simple Control Concept . . . . .                                              | 90         |
| 12.1.2    | Extended Control Concept . . . . .                                            | 92         |
| 12.2      | Trajectory Planning . . . . .                                                 | 93         |
| 12.2.1    | Trajectory Planning for the Pressure Control . . . . .                        | 93         |
| 12.2.2    | Trajectory Planning for the Position Measurement Region . . . . .             | 95         |
| <b>13</b> | <b>Validation</b>                                                             | <b>103</b> |
| 13.1      | Simple Control Concept . . . . .                                              | 104        |
| 13.1.1    | Nominal Case . . . . .                                                        | 104        |
| 13.1.2    | Model Uncertainties . . . . .                                                 | 105        |
| 13.1.3    | Disturbance Rejection . . . . .                                               | 105        |
| 13.2      | Extended Control Concept . . . . .                                            | 110        |
| 13.2.1    | Trajectory Planning and Control . . . . .                                     | 110        |
| 13.2.2    | Parameter Estimation . . . . .                                                | 113        |
| 13.2.3    | Overall Control Concept . . . . .                                             | 118        |

|                                                                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>14 Conclusions and Outlook</b>                                                                                        | <b>121</b> |
| <b>A Calculation of the Ordinary Differential Equations for the Gas Chamber of the Gas Charged Hydraulic Accumulator</b> | <b>125</b> |
| <b>B Calculation of the Extended Kalman Filter with Additional Gas Mass Estimation</b>                                   | <b>127</b> |
| <b>C Equipment of the Test Benches for the Pneumatic Linear Drives</b>                                                   | <b>129</b> |
| <b>D Calculation of the ordinary differential equations for the Pneumatic Cylinder</b>                                   | <b>131</b> |
| <b>E Influence of the Alignment on the Estimation Performance</b>                                                        | <b>133</b> |
| <b>References</b>                                                                                                        | <b>139</b> |