

Adrian Raisch

Optimierungsbasierte Auslegung und Steuerung in der Pneumatik und Vergleich mit elektromechanischen Antrieben

Band 54

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



Optimierungsbasierte Auslegung und Steuerung in der Pneumatik und Vergleich mit elektromechanischen Antrieben

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

Vorgelegt von
Adrian Manuel Raisch
geboren in Aalen

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber
Tag der mündlichen Prüfung:	23. September 2020

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2020

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 54

Adrian Raisch

**Optimierungsbasierte Auslegung und Steuerung
in der Pneumatik und Vergleich mit
elektromechanischen Antrieben**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7682-0

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 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart. Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny danke ich ganz herzlich für die Möglichkeit zur Mitarbeit und Promotion am ISYS, die Unterstützung und Förderung in den hier bearbeiteten Projekten, sowie das große entgegengebrachte Vertrauen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber, Inhaber der Professur für Fluid-Mechatronische Systemtechnik an der TU Dresden, bedanke ich mich für die freundliche Übernahme des Mitberichts. Herrn Prof. Dr. ir. Remco Leine vom Institut für nichtlineare Mechanik der Universität Stuttgart danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Die Ergebnisse dieser Arbeit entstanden während meiner Mitarbeit am Verbundprojekt „Anwenderorientierter Einsatz von energieeffizienter Antriebstechnik in der Produktion“. Dabei möchte ich den beteiligten Kolleginnen und Kollegen bei den Projektpartnern für die konstruktive Zusammenarbeit danken. Insbesondere geht mein Dank an Elvira Rakova und Vladimir Boyko von der TU Dresden, sowie Steffen Hülsmann und Florian Haizmann von der Festo SE & Co. KG.

Ganz besonders danken möchte ich außerdem meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für den hervorragenden fachlichen Austausch und das freundschaftliche Miteinander. Allen voran danke ich Michael Böhm, Andreas Gienger, Michael Laukenmann, Annika Mayer, Daniel Müller, Michael Ringkowski, Stefan Schaut und Kevin Schmidt für die vielen Diskussionen, die Unterstützung und die gemeinsam durchgegangenen Herausforderungen. Dem Sekretariat des Instituts, vertreten durch Gerlind Preisenhammer und Corina Hommel, möchte ich ganz herzlich für die administrative Unterstützung danken. Der Werkstatt, vertreten durch Joachim Endler und Sven Gutekunst, danke ich für die immer wieder schnelle sowie zielführende Zusammenarbeit und Hilfestellung.

Von ganzem Herzen bedanke ich mich bei meiner Frau Hanna. Danke für Deine großartige und nicht endende Unterstützung auf diesem Weg, den wir gemeinsam gehen dürfen. Schließlich gehört mein größter Dank Gott, zu dessen Ehre ich jeden Tag leben möchte (*Römer 11, 36*).

Leonberg, Oktober 2020

Adrian Raisch

Kurzfassung

Der effiziente Umgang mit Ressourcen und Energie ist eine zentrale Größe zum Erreichen der global gesetzten Klimaschutzziele. Der Industrie kommt dabei eine wesentliche Rolle zu. Im Bereich der Automatisierungs- und Handhabungstechnik fällt ein beachtlicher Teil des Energieverbrauchs bei der Erzeugung mechanischer Bewegungen an. Typischerweise umfassen diese Bewegungen Aus- und Einfahrprozesse zum Verschieben von Werkstücken oder Werkzeugen, sowie Halte- und Pressaufgaben, die durch eine vorgegebene aufzubringende Kraft gekennzeichnet sind. Zur Realisierung dieser Bewegungsaufgaben gibt es Lösungen unterschiedlicher Technologien, von denen im Rahmen dieser Arbeit pneumatische und elektromechanische Antriebe betrachtet werden.

Der Fokus liegt dabei auf den pneumatischen Antrieben, die einerseits weit verbreitet sind und die andererseits bei einer ungünstigen Parametrierung einen erheblichen Energieverbrauch verursachen. Um diesen zu reduzieren werden Methoden zur Auslegung und effizienten Steuerung untersucht. Ausgehend von einer geforderten Bewegungsaufgabe und einem dynamischen Simulationsmodell werden zunächst einzelne Antriebe betrachtet. Hier ist es das Ziel, eine im energetischen Sinne möglichst optimal an die Bewegungsaufgabe angepasste Aktorkonfiguration zu finden. Weiterhin wird auf die energieeffiziente Steuerung pneumatischer Aktoren eingegangen, wofür drei verschiedene Steuermuster optimiert und analysiert werden. Zur Herleitung von Auslegung und Steuerung wird dabei auf die detaillierte, dynamische Systembeschreibung einzelner Antriebe zurückgegriffen.

In Fabrik-Anlagen werden pneumatische Antriebe jedoch üblicherweise nicht einzeln, sondern in einer Vielzahl verwendet. Von einem Anlagenbauer kann hierbei in der Regel nicht erwartet werden, für jeden einzelnen der Aktoren mittels detaillierter Modelle nach der optimalen Lösung zu suchen. Stattdessen bedarf es einfach anwendbarer Vorgehensweisen um in der Praxis eine Energieeinsparung zu erzielen. Im nächsten Schritt werden daher eine optimierte Einstellung des Versorgungsdruckniveaus, eine kaskadenförmige Druckluftnutzung und eine automatisierte adaptive Steuerung hergeleitet. Dabei wird darauf geachtet, dass die Konzepte ohne die Verwendung detaillierter Simulationsmodelle oder experimentell zu erfassender Parameter anwendbar sind. Mit Hilfe dieser Maßnahmen für pneumatische Antriebe im Verbund, werden Einsparungen in der Größenordnung von 50% an einem Demonstrator experimentell nachgewiesen.

Abschließend werden die, im Rahmen der Untersuchung von pneumatischen Antrieben gewonnenen, Erkenntnisse in einen Kontext zu elektromechanischen Systemen gebracht. Da dieses nur bei einem adäquat ausgelegten Vergleichssystem sinnvoll möglich ist, werden Verfahren zur vereinfachten Auslegung vorgestellt. Unterlagert wird dort auf eine weitgehend analytische Lösung des Zustandsverlaufs zurückgegriffen, um einen geringen numerischen Aufwand zu erreichen. Auf dieser Basis werden die beiden betrachteten Technologien anhand von ausgewählten Szenarien gegenübergestellt und verglichen.

Im Ergebnis wird deutlich, dass sich die bevorzugte Technologie zu einer konkreten Anwendung aus energetischer Sicht nach der zu erfüllenden Aufgabe richtet.

Abstract

The efficient use of resources and energy is a key factor in achieving global climate protection goals, where the industry has an essential role to fulfil. A remarkable proportion of the energy consumption in the field of handling and automation technology originates from the generation of mechanical translations. Typically, those translations include motions of workpieces or tools, as well as holding and pressing tasks, which are defined by a given force. There are different technological solutions for the realization of those tasks, of which pneumatic and electromechanical drives are considered in the present work.

The focus of this thesis is on pneumatic drives which, on one hand are widely used, but on the other hand cause considerable energy consumption if the parameters are set unfavorably. To reduce this consumption, methods for design and efficient control are being investigated. Based on a required motion task and a dynamic simulation model, single drives are considered first. The goal here is to ideally find an optimally adjusted drive configuration for a given motion task that is energy efficient. Further, the efficient control of pneumatic drives is considered by optimizing and analyzing three different control patterns. For the derivation and dimensioning of the controls, the detailed dynamic simulation model for single cylinder drives is employed.

However, in production plants, pneumatic drives are used in larger numbers and not individually. In general, a plant manufacturer will not be able to search for the optimal solution of each drive by means of detailed simulation models. Instead, simple applicable approaches are necessary to achieve energy savings in practice. Therefore, in the next step, an optimized adjustment of the supply pressure, a cascaded air usage, and an automated adaptive control pattern are derived. Thus, care is taken to ensure that the measures are applicable without the knowledge of detailed simulation models or parameters, which need to be determined experimentally. Using those measures for pneumatic drives in groups, energy savings in the dimension of 50% are shown experimentally at a demonstrator.

Finally, the findings from the investigation of pneumatic drives are put into a context with electromechanical drives. As this is only possible for adequately designed comparative systems, a procedure for the simplified design of electromechanical drives is presented. This is based on a mostly analytic solution of the optimal consumption control problem, yielding a low numerical effort for calculating the time trajectories

of the system states and of the drive input. On this basis, the two technologies under consideration are using selected scenarios.

As a result, it becomes clear that from an energy perspective no general preference between the two technologies is reasonable. For a given task, the preferred solution relies on the specific motion problem.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	2
1.1.1	Energieeinsparmaßnahmen in der Pneumatik	4
1.1.2	Effizienter Einsatz elektromechanischer Antriebe in der Handhabungstechnik	9
1.2	Ziele und Aufbau der Dissertation	10
1.3	Betrachtete Anwendungssysteme	12
2	Modellierung pneumatischer Antriebe	23
2.1	Pneumatische Zylinderantriebe	23
2.1.1	Kinetik	23
2.1.2	Druckaufbaudynamik	27
2.1.3	Modellierung der Endanschlüsse	28
2.2	Pneumatische Systemkomponenten	35
2.2.1	Ventile	35
2.2.2	Schläuche, Drosseln und Verschaltung von Komponenten	37
2.3	Modellvalidierung und Kurzzusammenfassung	38
3	Energieverbrauch und -einsparpotentiale pneumatischer Antriebe	41
3.1	Energieverbrauch pneumatischer Antriebe	41
3.1.1	Drucklufterzeugung	42
3.1.2	Arbeitspotential der Druckluft	43
3.1.3	Druckluftverbraucher	48
3.2	Sparmaßnahmen für pneumatische Antriebe	51
3.3	Kurzzusammenfassung	54
4	Auslegung pneumatischer Einzelantriebe	55
4.1	Systemanalyse	55
4.2	Optimierungsbasierte Auslegung	65
4.2.1	Vergleichsverfahren zur Auslegung pneumatischer Antriebe	67
4.2.2	Diskretes Schema für die Auslegung pneumatischer Antriebe	69
4.2.3	Vergleichsergebnisse zur Auslegungsoptimierung	74
4.3	Kurzzusammenfassung	77

5	Steuerstrategien zur Verbrauchsreduktion pneumatischer Antriebe	79
5.1	Standard-Ansteuerung	79
5.2	Steuerstrategien zur Verbrauchsminimierung	80
5.3	Auswirkungen auf pneumatische Endlagendämpfungssysteme	87
5.4	Adaptive Steuerung pneumatischer Einzelantriebe	93
5.4.1	Adaptive Steuerung unter veränderten äußeren Bedingungen	97
5.5	Kurzzusammenfassung	101
6	Energieeinsparmaßnahmen für pneumatische Antriebe im Verbund	103
6.1	Strukturmaßnahmen für die Energieeffizienzsteigerung	103
6.1.1	Auslegung gekoppelter Aktoren und von Anlagen	104
6.1.2	Abluft-Kaskade	109
6.2	Online-Adaption zur Effizienzsteigerung auf Anlagenebene	117
6.3	Experimentelle Ergebnisse zur Optimierung des Demonstrators	119
6.4	Kombination von Strukturmaßnahmen und Online-Verfahren	129
6.5	Kurzzusammenfassung	132
7	Elektromechanische Antriebe in der Handhabungstechnik	135
7.1	Modellierung von elektromechanischen Servo-Antrieben	135
7.2	Positionsgeregelte elektromechanische Antriebe	140
7.3	Optimierte Steuertrajektorien für elektromechanische Antriebe	143
7.4	Auslegung elektromechanischer Antriebssysteme	149
7.5	Qualitativer Vergleich pneumatischer und elektrischer Antriebe	155
7.5.1	Bevorzugte Anwendungsgebiete	155
7.5.2	Bewertung über den Produktlebenszyklus	155
7.6	Kurzzusammenfassung	160
8	Zusammenfassung	161
A	Weitergehende Darstellungen von Optimierungsergebnissen	163
	Symbolverzeichnis	165
	Abbildungsverzeichnis	169
	Tabellenverzeichnis	173
	Literatur	175