

**“Analysis of the Economic and Ecological Properties
of Pneumatic Actuator Systems with Pneumatic Transformers”**

**„Analyse der wirtschaftlichen und ökologischen Eigenschaften
pneumatischer Antriebssysteme mit pneumatischen
Druckwandlern“**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Stephan Merkelbach

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katharina Schmitz

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2019

II Kurzfassung

Pneumatische Antriebe werden in vielen industriellen Anwendungen eingesetzt. In jüngerer Vergangenheit treten neben den Anschaffungskosten immer öfter auch die gesamten Lebenszykluskosten bei der Investitionsentscheidung in den Vordergrund.

Die Arbeit beschreibt eine ökonomische und ökologische Lebenszyklusanalyse pneumatischer Antriebe. Die Lebenszykluskosten pneumatischer Antriebe werden für typische Lastzyklen ermittelt und mit denen elektromechanischer Antriebe verglichen. Auf Basis des Exergiekonzepts wird die Effizienz der beiden Antriebsarten ermittelt. Aus den Energiekosten wird mit der notwendigen Investition sowie weiteren anfallenden Kosten der gesamte Lebenszyklus bilanziert. Weiterhin erfolgt eine Untersuchung des Effizienzpotentials pneumatischer Antriebe mit verschiedenen, einfach umzusetzenden Energiesparschalungen, die die Betriebskosten mit verhältnismäßig geringem Implementierungsaufwand erheblich senken können.

Um thermodynamisch bedingte Verluste zu reduzieren, kommt einer Reduktion des Betriebsdrucks steigende Aufmerksamkeit zu. Um die gleiche Antriebskraft und Laststeifigkeit zu erreichen, macht dies jedoch den Einsatz größerer Antriebe notwendig. Manche Anwendungen erfordern jedoch weiterhin kompakte Antriebe bei gleichzeitig hoher Kraft. Um die Installation eines zusätzlichen Hochdruckluftnetzes zu vermeiden, besteht die Möglichkeit des Einsatzes druckluftgetriebener Doppelkolbendruckübersetzer, die prinzipbedingt hohe Verluste und ein sehr lautes Betriebsgeräusch aufweisen. Die Arbeit stellt die Entwicklung und Funktionsprüfung eines neuartigen, auf Radialkolbeneinheiten basierenden Druckübersetzerkonzepts vor. Nach einer Simulationsstudie wird ein Funktionsmuster entwickelt und untersucht. Zur Steigerung der Effizienz werden verschiedene Optimierungen durchgeführt und validiert. Weiterhin erfolgt eine Abschätzung des Einflusses eines Niederdrucksystems mit Einsatz pneumatischer Druckverstärker auf die Effizienz sowie die Lebenszykluskosten der am Niederdrucknetz bzw. mit Luft auf verstärktem Hochdruck betriebenen Antriebe.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels wird der durch die Antriebe verursachte Ausstoß an Klimagasen zu einer wichtigeren Größe bei der Entscheidung zwischen unterschiedlichen Antriebssystemen. Zum Abschluss der Arbeit erfolgt daher eine Betrachtung der ökologischen Auswirkungen pneumatischer Linearantriebe mit Fokus auf den CO₂-Ausstoß. Hierzu wird anhand eines beispielhaften pneumatischen Zylinders eine Analyse der Emissionen über den Lebenszyklus von der Rohstoffherstellung bis zum Recycling durchgeführt.

III Abstract

Pneumatic drives are used in a wide variety of industrial applications. Recently, the life cycle costs (LCC) of the actuators become more important in investment decisions as the acquisition costs do not necessarily reflect the drives' economic efficiency. This thesis describes an economic and ecological life cycle analysis of pneumatic actuators. First, the LCC of the drives are estimated based on typical load cycles and compared the LCC of comparable electromechanical actuators. Therefore, the efficiency of both drive types is compared based on the exergy concept. Together with the acquisition costs and further cost elements, the LCC are calculated depending on the load cycles.

Furthermore, an assessment of the reduction potential for the exergy demand of the pneumatic drives is executed by an experimental investigation of different exergy saving measures with low installation effort which can reduce the demand for compressed air and working costs immensely while affording relatively low installation effort.

In addition to these measures installed in direct vicinity to the drive, nowadays, the operation of the whole pneumatic system at lower pressure gathers growing attention. A lower system pressure leads to a reduction of losses in the compressor. On the downside, the implementation of larger drives to gain the same output force and load stiffness is necessary. Some applications still afford small drives with high force. To avoid the implementation costs of an additional high-pressure system, local pressure boosting by means of pneumatically driven boosters is feasible. For this, double piston boosters are state of the art. Their working principle implies high exergy losses and noise emissions. The thesis presents the development and functional testing of a novel pressure booster concept based on pneumatic radial piston units. The concept is evaluated in a simulation study and a functional model is designed and manufactured. It is examined experimentally and different optimisations to increase its exergy efficiency are implemented and validated. As a conclusion, the impact of low-pressure pneumatic systems including pneumatic boosters on the overall efficiency and the LCC of the drives is estimated. This includes drives working at a reduced driving pressure as well as at boosted high pressure.

Facing climate change, the emissions of greenhouse gases (GHG) become more important as an additional parameter for the decision between different drive technologies. Besides the economic analysis of the drives, the thesis shows the results of a life cycle analysis focusing on the GHG emissions for one exemplary actuator including its whole life cycle from production of the materials up to the recycling of the components after their end-of-life.