

---

# **TRANSIENT PNEUMATIC SYSTEM SIMULATION**

## **Transiente Simulation pneumatischer Systeme**

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

vorgelegt von

Filipp Maksimovic Kratschun

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

Tag der mündlichen Prüfung: 17. April 2020

---

## ABSTRACT

In the age of digitization simulation models play a central role. For the time-efficient design or condition monitoring of complex systems, precise numerical calculation models are required because such systems cannot be calculated analytically. This applies in particular to highly dynamic systems using compressible gas as operating medium, since the underlying mathematical description is based on equations of gas dynamics. Examples can be found in process engineering, pneumatics and combustion engineering.

The aim of this thesis is the development of a transient simulation library for the time-efficient calculation of gas-powered networks consisting of the following components: pipe, pipe connector, valve, pipe with discontinuous cross-sectional extension, reservoir, L-connector, T-connector and cylinder.

The components are locally resolved in at least one dimension. For components where this is not possible due to complex physical behavior, the local discretization is carried out in two dimensions. The calculation core of each component is based on an explicit first order finite volume method. The validation of the components is carried out in two steps: analytically applying closed solution cases and experimentally on a test bench. The analytical validation serves as proof that the components provide physically correct results. Experimental validation is used to demonstrate the accuracy of individual components and systems consisting of several components.

The developed component library achieves an accuracy of more than 95 % compared to the experiment. The computing time per meter system's length is fifteen times the simulation time. However, this can be reduced considerably in future work. This would make it possible to realize real-time capable condition monitoring of complex gas-powered systems.

---

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Zeitalter der Digitalisierung spielen Simulationsmodelle eine zentrale Rolle. Für eine zeiteffiziente Auslegung oder Zustandsüberwachung komplexer Systeme braucht es genaue numerische Rechenmodelle. Die zunehmende Komplexität der Systeme erlaubt nicht länger eine analytische Rechnung. Dies gilt insbesondere für hochdynamische Systeme, deren Betriebsmedium kompressibles Gas ist und deren zugrundeliegende mathematische Beschreibung auf Gleichungen der Gasdynamik fußt. Beispiele finden sich in der Prozesstechnik, Pneumatik und der Verbrennungstechnik.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Simulationsbibliothek zur zeiteffizienten Berechnung gasbetriebener Netzwerke bestehend aus den folgenden Komponenten: Rohr, Rohrverbinder, Ventil, Rohr mit unstetiger Querschnittserweiterung, Reservoir, L-Stück, T-Stück und Zylinder. Die Darstellung der Herangehensweise ermöglicht es dem Leser dieser Arbeit, jede Komponente nachprogrammieren zu können.

Die Komponenten werden in mindestens einer Dimension örtlich aufgelöst. Bei Komponenten, bei denen dies aus physikalischen Gründen nicht zulässig ist, erfolgt die örtliche Diskretisierung in zwei Dimensionen. Der Berechnungskern jeder Komponente basiert auf einem expliziten Finite-Volumen-Verfahren erster Ordnung. Die Validierung der Komponenten erfolgt in zwei Stufen: analytisch anhand bekannter Grenzfälle und experimentell an einem Prüfstand. Die analytische Validierung dient als Nachweis dafür, dass die Komponenten physikalisch korrekte Ergebnisse liefern. Mit Hilfe der experimentellen Validierung lässt sich zeigen, welche Abbildungsgenauigkeit einzelner Komponenten sowie Systeme bestehend aus mehreren Komponenten erreicht werden kann.

Die entwickelte Komponentenbibliothek erreicht im Vergleich zum Experiment eine Genauigkeit von über 95 %. Die Rechendauer bezogen auf einen Meter Länge des Systems beträgt das fünfzehnfache der Simulationszeit. Diese kann jedoch in zukünftigen Arbeiten erheblich reduziert werden. Dadurch ließe sich eine echtzeitfähige Zustandsüberwachung komplexer gasgetriebener Systeme realisieren.