

# TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA)  
Fachgebiet Experimentelle Strömungsmechanik  
Prof. Dr.-Ing. C. O. Paschereit

---

Bachelorarbeit zum Thema

## Berechnung des transienten Betriebsverhaltens eines Axialverdichters unter Berücksichtigung der Anlage

Max Noack

Berlin, den 17. November 2017

Email: max.noack@campus.tu-berlin.de  
Matrikelnummer: 339103  
Studiengang: Verkehrswesen  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. C. O. Paschereit  
Dr. rer. nat. Andreas Spille-Kohoff (CFX Berlin)  
M. Sc. Tim Rähse

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der thermischen Strömungsmaschinen und der Anlagencharakteristik</b>	<b>3</b>
2.1 Klassifizierung von Turbomaschinen . . . . .	3
2.2 Thermodynamik . . . . .	3
2.3 Ähnlichkeit . . . . .	7
2.4 Kennfelder . . . . .	9
2.5 Schallausbreitung . . . . .	10
2.5.1 Die Wellengleichung . . . . .	10
2.5.2 Rohr . . . . .	12
2.5.3 Querschnittsänderung . . . . .	14
2.5.4 Verzweigung . . . . .	17
<b>3 Numerische Methoden</b>	<b>21</b>
3.1 Einleitung . . . . .	21
3.2 Feld-Simulation mit ANSYS CFX . . . . .	23
3.3 System-Simulation mit Flownex SE . . . . .	24
<b>4 Kennfeldberechnung mit ANSYS CFX</b>	<b>27</b>
4.1 Axialventilator . . . . .	27
4.2 Lösungsmethoden . . . . .	27
4.3 Ergebnisse und Bewertung . . . . .	29
<b>5 Berechnung des Betriebsverhaltens von Axialventilatoren mit Flownex SE</b>	<b>31</b>
5.1 Numerische Berechnung verschiedener Anlagen . . . . .	31
5.1.1 Numerische Berechnung eines Druckimpulses in einem Rohr	31
5.1.2 Numerische Berechnung eines Druckimpulses in einem halb geöffnetem Rohr . . . . .	37
5.1.3 Numerische Berechnung eines Druckimpulses in einem Rohr mit Querschnittsänderung . . . . .	38

5.1.4	Verzweigung . . . . .	41
5.2	Kennfeldimplementierung und Interpolation . . . . .	43
5.3	Stationäre und transiente Berechnung des Axialventilators in verschiedenen Anlagen . . . . .	45
5.3.1	Einfache Anlage mit Drossel . . . . .	45
5.3.2	Parallelschaltung . . . . .	49
5.4	Ergebnisse und Bewertung . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>57</b>

## 6 Zusammenfassung und Fazit

Thema dieser Bachelorarbeit ist die numerische Berechnung des stationären und transienten Betriebsverhaltens von Axialventilatoren mit dem eindimensionalen Strömungslöser von *Flownex SE*. Es soll gezeigt werden, wie sich der Betriebspunkt der Ventilatoren verhält, wenn unter verschiedenen Anfangsbedingungen Störungen, in Form von Druckschwankungen, auftreten.

Dazu wurde zunächst die Schallausbreitung in Armaturen und Anlagen simuliert und mit der Theorie verglichen, um valide Ergebnisse zu erhalten. Für diese Arbeit wurde dazu das Verhalten eines Druckimpulses untersucht, der durch Rohre, Drosseln und Verzweigungen transportiert wird. Es hat sich gezeigt, dass die Schallausbreitung sowie die damit verbundenen Reflexionen und Transmissionen mit den entsprechenden Randbedingungen in *Flownex SE* sehr genau berechnet werden können. Dabei muss ein besonderes Augenmerk auf das gewählte Berechnungsverfahren in den Lösereinstellungen gelegt werden. Das als Standard eingestellte implizite Verfahren liefert zwar stabile Lösungen, ist aber erst für sehr kleine Zeitschrittweiten bei einer Betrachtung der Schallausbreitung exakt. Da sich Störungen immer mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten und sich die Reflexionen sowie Transmissionen korrekt berechnen lassen, können Änderungen des Betriebsverhaltens gut nachvollzogen werden.

Der Strömungslöser in *Flownex SE* löst die eindimensionalen Erhaltungsgleichungen. Grenzschichteffekte, 3D-Einflüsse, Turbulenzmodelle usw. können nicht berechnet bzw. berücksichtigt werden. Stattdessen führen hinterlegte Kennlinien der Komponenten zu den entsprechenden Druckverlusten und damit zur numerischen Lösung. Deshalb wurde die Kennlinie des Ventilators in einer 3D-Feldsimulation mit *ANSYS CFX* berechnet. Die Kennlinien der Anlagenkomponenten sind in *Flownex SE* bereits hinterlegt.

Druckschwankungen, die aufgrund von Störungen und den darauf folgenden Reflexionen sowie Transmissionen in einer Anlage auftreten, können das Betriebsverhalten eines Axialventilators nachhaltig beeinflussen. Das transiente Betriebsverhalten von Ventilatoren sowie die zeitlichen und räumlichen Druckverteilungen in der Anlage können in einer 1D-Systemsimulation mit *Flownex SE* berechnet werden. In dieser Arbeit wurden Berechnungen für verschiedene Anlagen mit einem oder zwei Ventilatoren in einer Parallelschaltung durchgeführt. Es konnten stabile sowie instabile Betriebsbereiche nachgewiesen und valide Reflexionen sowie Transmissionen der Störungen berechnet werden.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse können weitere Berechnungen durchgeführt werden. In dieser Arbeit wurde durchgehend Luft als Medium in der Anlage angenommen. Die in *Flownex SE* verwendete Komponente für den Axialventilator,

## 6 Zusammenfassung und Fazit

die *Variable Speed Pump*, kann zudem auch inkompressible Medien annehmen. Demnach können hydraulische Druckstöße in Anlagen untersucht werden. Außerdem können die in dieser Arbeit erstellten Anlagen um bspw. Ventile sowie Wärmetauscher vergrößert und erweitert werden. Zudem können zweiphasige Fluide, die in thermischen Kreisprozessen vorkommen, angenommen werden. Des Weiteren kann das Betriebsverhalten mehrstufiger Turbomaschinen, wie z. B. Hochdruckverdichter sowie -turbinen, untersucht werden.

Alles in allem eignet sich *Flownex SE* hervorragend für derartige Berechnungen. Allem voran sind die kurzen Berechnungszeiten, selbst bei einer sehr feinen zeitlichen sowie räumlichen Auflösung, ausschlaggebend für effiziente Simulationen. So können selbst sehr komplexe Anlagen nachgebaut und hinsichtlich strömungsmechanischer Phänomene untersucht werden.