

## 1. Einleitung und Motivation

Bei der elektrischen Energieerzeugung haben sich Gasturbinenanlagen etabliert. Eingesetzt in modernen Kombikraftwerken werden Wirkungsgrade bis 60% erzielt. Die kontinuierliche Effizienzsteigerung auf der Gasturbinenseite wurde durch erhöhte Druckverhältnisse und Turbineneintrittstemperaturen erzielt, die wiederum durch verbesserte Schaufelmaterialien und effizientere Kühlung ermöglicht werden.

Neben der Optimierung der Komponenten zur Wirkungsgradsteigerung wächst das Bewusstsein für eine nachhaltige und umweltschonende Energieversorgung. Daher rückt die Verringerung der Schadstoffemissionen zunehmend in den Vordergrund. Durch den Einsatz von Ringbrennkammern und der mageren Vormischverbrennung, konnten Kohlenmonoxide, Stickoxide und Kohlenwasserstoffe erheblich reduziert werden. Bei der mageren Vormischverbrennung werden die Flammentemperatur und damit die thermische Stickoxidbildung durch einen hohen Luftüberschuss reduziert. Allerdings ist dieses Verbrennungskonzept anfällig für Brennkammerschwingungen. Eine Rückkopplung zwischen den Fluktuationen der Energiefreisetzungsrate der Verbrennung und den periodischen Druckschwankungen in der Brennkammer verursacht selbsterregte thermoakustische Instabilitäten mit hohen Druckamplituden, die wiederum starke mechanische Belastungen des Systems zur Folge haben.

Die selbsterregten Brennkammerschwingungen mit hoher Amplitude und meist niedriger Frequenz verursachen einen unzumutbaren Lärm und gefährden den sicheren Betrieb einer Gasturbinenanlage. Dabei wechselwirken in der Brennkammer und im Brenner instationäre Strömungs- und Mischungsvorgänge mit der Reaktionskinetik der Verbrennung, der Akustik der Brennkammer und der ganzen Anlage. Daraus resultiert eine sehr hohe Komplexität der Thematik, so dass bis heute keine zufriedenstellende, industrietaugliche Lösung zur Vorausberechnung dieses Phänomens existiert. Somit werden auch in Zukunft experimentelle Untersuchungen ihren Beitrag zur Untersuchung selbsterregter Verbrennungsschwingungen leisten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Drallbrennerprüfstand entworfen und erprobt. Dieser Prüfstand soll ein möglichst breites Parameterspektrum abdecken und von seinen Leistungsdaten gasturbinenähnlich sein. Mit diesem Parameterfeld werden thermoakustisch instabile Zustände ermittelt und gezielt anfahrbar sein. Des Weiteren wird er die Möglichkeit bieten, die Verbrennung aktiv zum Schwingen anzuregen bzw. eine schwingende Verbrennung zu beeinflussen.

Zunächst wird die kalte Strömung des Drallbrenners ohne Verbrennung untersucht, um ein Verständnis für die vorherrschenden Strömungsvorgänge zu erhalten und den Einfluss des Dralls zu untersuchen.

In einem zweiten Schritt werden Heißversuche an dem Prüfstand durchgeführt. In dem breiten Parameterfeld des Prüfstandes sind Betriebspunkte zu finden, in denen die Verbrennung des Prüfstandes schwingt. An einem dieser Betriebspunkte wird

beispielhaft die aktive und passive Beeinflussung von Verbrennungsschwingungen gezeigt.

Im Rahmen der Prüfstandsauslegung wird mit numerischer Strömungssimulation das Strömungsverhalten des Prüfstandes ermittelt. Die Simulationsergebnisse sind weiterhin die Basis zur Ermittlung betriebsrelevanter Parameter. Somit kann gezeigt werden, dass sich ein Verbrennungsprüfstand, der ein weites Parameterfeld bietet, zu thermoakustischen Schwingungen anregen lässt.

## 2. Technische und physikalische Grundlagen

### 2.1. Brenner und Brennkammer

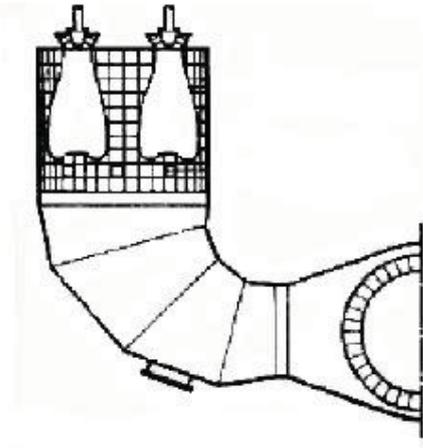
An heutige Brennkammern werden hohe Anforderungen gestellt:

- Bei der Verbrennung soll das Arbeitsmedium eine möglichst hohe Temperatur erreichen, um eine hohe Leistungsdichte und einen hohen thermischen Wirkungsgrad sicherzustellen. Dabei werden hohe Anforderungen an die Materialien und die Kühlung in der Brennkammer und den Turbinenschaufeln gestellt.
- Die Aerodynamik der Brennkammer ist so gestaltet, dass die Druckverluste in der Brennkammer gering sind und Werte unter 3% bis 4% des Absolutdrucks erreichen.
- Des Weiteren gelten gesetzlich vorgeschriebene Grenzwerte für Schadstoffemissionen, die eingehalten werden müssen. Die Hauptschadstoffemissionen sind dabei Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (C<sub>x</sub>H<sub>x</sub>).
- Die Verbrennung soll über einen weiten Betriebsbereich optimal arbeiten. Das bedeutet, dass sowohl im stationären Betrieb, bei schnellen Lastwechseln, Lastabwurf als auch beim Hochfahren der Maschine die chemische Umsetzung des Brennstoffs stabil erfolgen soll. Außerdem muss in allen Betriebsbereichen die Stabilität der Flamme durch einen ausreichenden Abstand zur Löschgrenze gewährleistet werden.
- Um einen sicheren Betrieb einer Brennkammer zu garantieren, müssen neben der statischen Stabilität auch thermoakustische Brennkammerschwingungen vermieden werden. Ferner müssen Flammenrückschläge und Selbstzündungen in den Brennern verhindert werden.

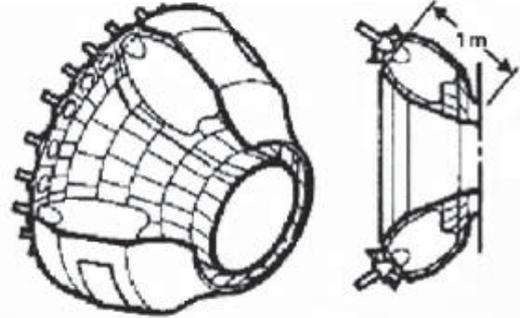
Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, setzt man in heutige Gasturbinen Ringbrennkammern und Rohr-Brennkammern mit Vormischbrennern ein. Sie sind eine Weiterentwicklung der außen liegenden Silobrennkammer.

Ältere Gasturbinen sind mit Diffusionsbrennern ausgestattet. Sie zeichnen sich durch einen weiten Arbeitsbereich (Luft/Brennstoff-Verhältnis) und einer guten Flammenstabilisierung aus, so dass sie in einem weiten Lastregelbereich betrieben werden können. Die große Brennkammerlänge resultiert in hohen Verweilzeiten des Brennstoffs in der Brennkammer. Diese gewährleisten zusammen mit dem großen Brennkammervolumen einen optimalen Ausbrand. Außerdem ist die Turbine durch die Brennkammerlänge keiner Wärmestrahlung der Flamme ausgesetzt. Um die Schadstoffmenge zu reduzieren, werden inerte Stoffe wie Wasser, Luft oder Stickstoff in die Brennkammer eingedüst, um die Verbrennungstemperatur zu senken und so die Stickoxidbildung zu verringern.

Heute werden Silobrennkammern weiterhin eingesetzt, allerdings werden sie vorwiegend mit Vormischbrennern betrieben, weshalb sie sehr viel kürzer sind und sich damit auch die zu kühlende Oberfläche verkleinert hat. Im Bereich der Sonderbrennstoffe kommen nach wie vor Diffusionsbrenner zum Einsatz.



Silobrennkammer



Ringbrennkammer



Rohrbrennkammer (Sicht auf Drallerzeuger)

Abbildung 2.1.1 Brennkammertypen (Lechner und Seume (2003))

In den 70er Jahren beginnt die Entwicklung der Ringbrennkammern, die vergleichsweise klein in ihren Dimensionen gegenüber den Silobrennkammern sind. Ringbrennkammern sind zuvor nur in Flugtriebwerken eingesetzt worden, doch durch den Einsatz in Gasturbinen können die Aufenthaltszeiten der Gase in der Brennkammer bei hohen Temperaturen erheblich reduziert und dadurch die Stickoxidbildung drastisch vermindert werden. Durch die kompakte Bauweise der Ringbrennkammern ist ein direkter Übergang von der Brennkammer zum Turbineneintritt vorhanden, so dass höhere Turbineneintrittstemperaturen ermöglicht werden können, da keine Verluste durch Umlenkung und großflächige Gehäusekühlung entstehen. Dieses macht eine bessere Schaufelkühlung und hitzebeständigere Materialien erforderlich. Die Brenner sind gleichmäßig auf dem Umfang verteilt und sorgen so für eine homogene Verbrennung und ein gleichmäßigeres Temperaturprofil am Turbineneintritt. Der rela-

tive Wandabstand der Flamme ist in Ringbrennkammern größer als in Silobrennkammern, so dass die Wandtemperatur und damit der Kühlaufwand verringert wird.

Eine weitere Bauform moderner Brennkammern ist die Rohrbrennkammer. Die Anordnung von mehreren Rohrbrennkammern auf dem Umfang der Gasturbine zu einer Ring-Rohrbrennkammer bietet den Vorteil, dass die thermischen und mechanischen Eigenschaften der einzelnen Rohrbrennkammer auf einem Komponentenprüfstand unter Maschinenbedingungen untersucht werden kann. Außerdem lassen sich diese Verbrennungssysteme verhältnismäßig schnell austauschen. Bei den Rohrbrennkammern ist allerdings der Übergang von der Brennkammer zur Turbine mechanisch sehr stark belastet. Ein Vorteil von Rohrbrennkammern ist ihre Stabilität gegenüber selbsterregten Verbrennungsschwingungen. Während sich in der Ringbrennkammer Umfangsmoden ausbilden können (Seume (1998)), ist dies in der Rohrbrennkammer bauartbedingt quasi nicht möglich. Diese Eigenschaft mag dazu beigetragen haben, dass Rohrbrennkammern auch in modernen Gasturbinen (z.B. Siemens SGT5-8000H) eingesetzt werden.

Die Reduktion der Emissionen wird im Wesentlichen durch die Einführung der mageren Vormischverbrennung möglich, die die klassische Diffusionsflamme abgelöst hat.

Generell wird zur Beschreibung des Luft- oder Brennstoffüberschusses die Luftzahl  $\lambda$  oder ihr Kehrwert, das Äquivalenzverhältnis  $\phi$ , verwendet. Die Luftzahl

$$\lambda = (\dot{m}_L / \dot{m}_G)_{real} / (\dot{m}_L / \dot{m}_G)_{stoech} \quad (2-1)$$

ist das Verhältnis zwischen dem realen Brennstoff/Luftverhältnis zu dem stöchiometrischen Brennstoff/Luftverhältnis.

Bei einer Luftzahl von  $\lambda = 1$  verbrennt der Brennstoff stöchiometrisch. Das bedeutet, dass ihm genau so viel Sauerstoff zugeführt wird, wie er für die Verbrennungsreaktion benötigt. Wird eine Verbrennung mit Luftüberschuss ( $\lambda > 1$ ) durchgeführt, wird sie als mager bezeichnet. Verbrennungen mit Brennstoffüberschuss ( $\lambda < 1$ ) werden als fett bezeichnet.