

MODELLIERUNG VARIABLER SEKUNDÄRLUFTSYSTEME ZUR BEWERTUNG IHRER AUSWIRKUNGEN AUF DAS GESAMTSYSTEM GASTURBINE

D. Woelki & D. Peitsch, Fachgebiet Luftfahrtantriebe, Institut für Luft- und Raumfahrt
Technische Universität Berlin, Marchstraße 12-14, 10587 Berlin, Deutschland

Zusammenfassung

Die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads von Gasturbinen wird unter anderem durch die Steigerung der Turbineneintrittstemperatur realisiert. Die damit einhergehenden wachsenden Anforderungen an die Kühlung der Turbine machen dabei eine deutliche Erhöhung der vom Sekundärluftsystem bereitgestellten Kühlluft nötig. Darüber hinaus deckt das Sekundärluftsystem eine Reihe weiterer Aufgaben zum sicheren Betrieb der Gasturbine ab. Allerdings führt die Luftentnahme im Verdichter zu einem erheblichen Wirkungsgradverlust für den Kreisprozess, da die bereits komprimierte Luft nicht für die Verbrennung genutzt werden kann. Ein Mehrbedarf an Kühlluft wirkt daher dem durch höhere Prozesstemperaturen erzielten Gewinn im thermischen Wirkungsgrad entgegen.

Konventionelle Sekundärluftsysteme von Flugtriebwerken werden ohne eine Regelung ausgelegt. Ihre Auslegung erfolgt deshalb auf kritische Betriebspunkte hin. Allerdings fallen die Anforderungen der Verbraucher des Luftsystems in verschiedenen Betriebspunkten sehr unterschiedlich aus. Ein starr ausgelegtes System stellt daher über weite Teile des Betriebsbereichs zu große Massenströme zur Verfügung. Demgegenüber könnten die einzelnen Massenströme durch ein flexibles Sekundärluftsystem besser an die Anforderungen in jeweiligen Betriebspunkt angepasst werden. Dies würde in einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads und somit einer erheblichen Verringerung des Treibstoffverbrauchs für die Gesamtmission des Flugzeugs resultieren. Gleiches gilt, wenn auch mit anderen Randbedingungen, für stationäre Gasturbinen, die z. B. für die Stromproduktion eingesetzt werden.

Dieses Paper setzt an der Auslegung eines solchen flexiblen Sekundärluftsystems an. Die hierfür gewählte Methodik verbindet die Triebwerksleistungsrechnung als Simulation des Gesamtsystems *Gasturbine* mit einer detaillierten Modellierung des Sekundärluftsystems. Dieses gekoppelte Modell lässt Untersuchungen zur Optimierung von Sekundärluftmassenströmen über den gesamten Betriebsbereich zu. Dabei sollen insbesondere die Auswirkungen variabler Luftmassenströme auf die vom Luftsystem beeinflussten Komponenten sowie das Leistungsverhalten der Maschine beleuchtet werden. Der Einsatzbereich der Methodik beschränkt sich dabei nicht auf Luftfahrtantriebe, sondern ist unabhängig von der Applikation der Gasturbine.

Neben den zentralen Modellen für die Leistungsrechnung und das Sekundärluftsystem werden weitere für eine erfolgreiche Kopplung benötigte Modelle vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Abbildung aller für das Luftsystem relevanten Effekte, wie der Berücksichtigung von Wärmeübergängen, veränderten Dichtungsspaltgeometrien und der Korrektur der Luftentnahmestellen im Leistungsrechnungsmodell. Darüber hinaus wird die Umsetzung dieser Methodik in einer modularen Simulationsumgebung vorgestellt. Letztere wird unter dem Gesichtspunkt einer möglichen Erweiterung der vorhandenen Modellierung und einer einfachen Anbindung alternativer Simulationstools, z. B. firmeneigener Software, entwickelt.

NOMENKLATUR

Δ		Differenz	Indizes:	
Π	[--]	Druckverhältnis	'	Nulldimensional
δ	[mm]	Dichtungsspalt	4	Turbineneintritt
η	[--]	Wirkungsgrad	bleed	Quelle/Luftentnahmestelle
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom	cold	Kaltzustand
N	[1/s]	Drehzahl	disk	Scheibe
p	[Pa]	Druck	HDV	Hochdruckverdichter
Q	[J/s]	Wärmestrom	i	Laufvariable
SFC	[g/(kN s)]	Spez. Brennstoffverbrauch	SAS	Sekundärluftsystem
T	[K]	Temperatur	sink	Senke
			turb	Turbine

1. EINLEITUNG

Die Herausforderungen zur Reduktion der CO₂-Emissionen in der Luftfahrt und Energieerzeugung erfordern u.a. eine Senkung des missions- bzw. laststufenbezogenen spezifischen Brennstoffverbrauchs (SFC). Eine hiermit verknüpfte Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads über den typischen Betriebsbereich der Maschine kann über eine Steigerung der Turbineneintrittstemperatur (T_4) realisiert werden. Die hierdurch erhöhten Ansprüche an die Kühlung thermisch hoch belasteter Bauteile machen die Entwicklung neuer Materialien und/oder Kühltechniken erforderlich. Alternativ kann diesem Problem durch eine Erhöhung der durch das Sekundärluftsystem (SAS, secondary air system) bereitgestellten Kühlluft begegnet werden. Um die einzelnen Verbraucher des SAS bedienen zu können, wird die Sekundärluft an Positionen im Verdichter entnommen, an denen ein ausreichend hoher Druck herrscht. Ein großer Anteil der Sekundärluft wird der Hauptströmung in der Turbine wieder zugeführt. Dadurch, dass die Sekundärluft dem Kreisprozess nach Zuführung von Verdichterarbeit entzogen wird, aber nicht am Verbrennungsprozess teilnimmt, stellt sie ihrerseits einen Wirkungsgradverlust dar. Dieser mindert den Gewinn durch eine erhöhte Turbineneintrittstemperatur. Eine auf unterschiedliche Betriebspunkte hin optimierte Einstellung der Kühlluftmassenströme hat somit großes Potenzial zur Senkung des missionsbezogenen SFC von Luftfahrtantrieben. Gleiches gilt für den Betrieb stationärer Gasturbinen zur Stromerzeugung, die steigenden Anforderungen in der Lastflexibilität begegnen. Über die Effizienzsteigerung hinaus ist eine laststufenangepasste Kühlluftführung auch für die Einhaltung gesetzlicher Emissionsauflagen und verkürzte Anfahrzeiten von Bedeutung [1, 2].

Die praktische Umsetzung einer Betriebspunktabhängigen Kühlluftführung kann nur durch ein variables SAS realisiert werden. Durch die vielfältigen Wechselwirkungen mit dem Gesamtsystem muss die Auslegung eines solchen SAS auf Gesamtsystemebene erfolgen [3]. Von zentralem Interesse sind hierbei die Auswirkungen variabler Luftmassenströme auf die Turbokomponenten Verdichter und Turbine, auf andere Verbraucher des SAS, auf die Gewährleistung des sicheren Betriebs der Maschine und auf die Veränderung der Lebensdauern der heißen Bauteile. Das Ziel ist daher die Entwicklung einer Methode, die die Auslegung variabler SAS unter Systemaspekten ermöglicht.

Als Basis wird im folgenden eine Methode vorgestellt, die die SAS-Modellierung mit einer Simulation des Gesamtsystems Gasturbine verknüpft, um das Potenzial von angepassten Sekundärluftmassenströmen in verschiedenen Betriebspunkten aufzuweisen und deren Auswirkungen auf die angesprochenen Komponenten direkt zu simulieren. Neben den notwendigen Einzelmodellen wird auch die modulare Architektur der hierfür erstellten Simulationsumgebung vorgestellt.

2. SEKUNDÄRLUFTSYSTEM (SAS)

2.1. Aufgaben des SAS

Das Sekundärluftsystem erfüllt im Triebwerk eine Vielzahl wichtiger Aufgaben. Die in modernen Triebwerken entnommenen Sekundärluftmassenströme nehmen dabei mit einem Anteil von ca. 20% des Kernmassenstroms eine erhebliche Größenordnung ein.

Der größte Teil der Sekundärluft wird für die Kühlung der thermisch hoch beanspruchten Bauteile, insbesondere der Turbinenschaufeln und -scheiben, aufgewendet. Ein Bedarf an Kühlluft ergibt sich aus Gastemperaturen, die die zulässigen Materialtemperaturen überschreiten und somit die Integrität der Bauteile beeinträchtigen. Die benötigte Kühlluftmenge ergibt sich dadurch als Funktion des Betriebspunktes, des Werkstoffs und der eingesetzten Kühltechnik.

Eine weitere wichtige Aufgabe besteht in der Abdichtung des Scheibenzwischenraums vom heißen Hauptströmungspfad. Eintretende Heißluft beeinflusst die Temperaturprofile der Turbinenscheiben kritisch, was sich direkt in einer verminderten Lebensdauer widerspiegelt. Aus diesem Grund wird der axiale Spalt zwischen Statoren und Rotoren mit Sekundärluft abgedichtet.

Die Lagerkammer bildet eine sicherheitskritische Schnittstelle zwischen SAS und Ölsystem. Ein Austreten des Öls kann abhängig vom lokalen Auftreten schwerwiegende Folgen haben, z. B. ein Ölfeuer im Scheibinnenraum oder die Kontamination der Kabinenluft. Zur Vermeidung von Ölaustritt werden daher auch die Lagerkammern mit Sekundärluft abgedichtet.

Eine unterstützende Funktion kommt dem SAS bei der Lagerlastkontrolle zu. Verdichter und Turbine prägen dem Rotor entgegengesetzt wirkende axiale Kräfte auf. Da der Hochdruckverdichter (HDV) stärker nach vorne als die Hochdruckturbine (HDT) nach hinten zieht, entspricht die Richtung der Resultierenden der des Verdichters. Bei der Auslegung des SAS ist eine gezielte Einstellung der auf Vorder- und Hinterseiten der Turbinenscheiben aufgeprägten Drücke sowie ihrer Wirkflächen möglich. Durch die Kolbenwirkung wird somit eine dem Verdichter entgegengerichtete, zusätzliche Axialkraftkomponente erzeugt, die zu einer Reduzierung der Resultierenden führt. Dies bewirkt eine Verringerung der Lagerlast am Kugellager.

Weitere Aufgaben nimmt das SAS durch das Abblasen von Verdichterluft zur Verdichterstabilisierung und die Bereitstellung von Zapfluft wahr. Zapfluft wird für die Kabinenbelüftung, Enteisung von Gondel, Flügeln und Einlauf, die Kühlung von Anbauteilen sowie die passive und aktive Spaltkontrolle durch Kühlung der Turbokomponentengehäuse verwendet.

2.2. Funktionsweise des SAS

Die Quellen der Sekundärluft stellen Entnahmestellen im Verdichter dar (Bleeds). Die Senken bilden die Stellen, an denen die Sekundärluft in die Hauptströmung zurückgeführt oder dem System Gasturbine entzogen werden. Zwischen Quellen und Senken stellen sich über den Betriebsbereich der Maschine veränderliche Druckverhältnisse ein. Für Kühlluft ist dabei der Totaldruck und für Dichtluft der statische Druck der Hauptströmung maßgeblich. Das Druckgefälle ist die treibende Kraft der Luftmassenströme und bestimmt deren Größe. Wo die Luft im Verdichter abgezapft wird, hängt daher maßgeblich von den Anforderungen des jeweiligen Verbrauchers bzw. dem Strömungszustand an der Senke ab. Weiterhin ist zu beachten, dass die Luft höheren Drucks aus den hinteren Verdichterstufen „teuer“ ist, weil an ihr bereits viel Arbeit verrichtet wurde. Der gezielten Auswahl der Quelle kommt daher bei der Auslegung des SAS eine hohe Bedeutung zu und resultiert im Vorhandensein mehrerer, über die Verdichterstufen verteilter Bleeds.

Das Sekundärluftsystem selbst kann zunächst in ein äußeres und inneres Subsystem unterteilt werden. Die

Elemente des äußeren SAS stellen im Wesentlichen statische Kavitäten, Rohre, Verzweigungen und Ventile dar. Im inneren SAS wird die Sekundärluft nabenseitig entnommen. Es setzt sich insbesondere aus statischen und rotierenden Kavitäten, Wirbelgleichrichtern, Dichtungen, Blenden und Vordralldüsen zusammen. Sie alle haben durch charakteristische Druckverluste und Durchsatzverhalten Einfluss auf die Einstellung der Massenströme und Drücke innerhalb des SAS.

Die Einstellung der Sekundärluftmassenströme ergibt sich somit durch eine gezielte Anordnung strömungsführender Elemente und Restriktoren. Eine Regelung ist z. B. durch den Einsatz von Ventilen möglich.

2.3. Interaktion mit dem Gesamtsystem

Auf der einen Seite steht die Abhängigkeit des SAS vom Kreisprozess, d.h. den jeweiligen Zustandsgrößen der Hauptströmung an Quellen und Senken. Auf der anderen Seite wird der Kreisprozess selbst maßgeblich vom SAS beeinflusst: Die vom SAS entzogenen Massenströme beeinflussen die Zustandsänderung des Arbeitsgases im Verdichter und verrichten in der Turbine nur zum Teil Arbeit. Dies hat direkte Auswirkungen auf das Leistungsverhalten der Gasturbine. Die Durchmischung von Kühl- und Dichtluft mit der Hauptströmung spiegelt sich in einer Änderung der spezifischen Enthalpie wider. Das SAS ist Ursache vielfältiger Verluste, die in [4] differenziert und diskutiert werden. Das SAS selbst wird im Weiteren insbesondere durch das thermische Verhalten der Gasturbine beeinflusst. Für alle Wechselwirkungen zwischen beiden Systemen liegt eine starke Abhängigkeit vom Betriebspunkt vor. Somit sind die Größen der Sekundärluftmassenströme selbst Funktionen des jeweils gefahrenen Betriebspunktes.

Demgegenüber stehen Anforderungsprofile der Luftsystemverbraucher, die ebenfalls einer Abhängigkeit vom Betriebspunkt unterliegen. Dabei steht die Erfüllung der kritischen Anforderungen in jedem Betriebspunkt im Vordergrund. In Konsequenz findet ein SAS, das wie bei Luftfahrtantrieben üblich als starres, weitestgehend unregelmäßiges System konzipiert ist, seinen Auslegungspunkt in dem als kritischsten definierten Betriebspunkt. Für alle anderen Betriebspunkte bedeutet das ein potenzielles Überangebot an Sekundärluft – oder anders ausgedrückt, unnötig hohe Verluste.

Vor diesem Hintergrund erscheint die Auslegung eines variablen SAS mit Betriebspunktabhängiger Anpassung der Sekundärluftströme sinnvoll. Zur Realisierung eines variablen Luftsystems gibt es zwei Möglichkeiten: Bei stationären Gasturbinen bietet sich eine Ventilregelung an. Diese findet bereits heute bei der Umstellung vom niedrigen Lastbereich auf Volllast Anwendung. Für Luftfahrtantriebe ist diese Variante aufgrund des sehr komplexen Regelungssystems ungeeignet. Alternativ kommen hier selbstregulierende Strömungselemente, sogenannte Fluidics in Frage [5, 6]. Ein wichtiger Meilenstein bei der Auslegung variabler SAS ist daher die Ausarbeitung von Regelungsansätzen, anhand derer Ventile angesteuert bzw. Fluidics konfiguriert werden können.

Die beschriebenen Interaktionen zwischen Kreisprozess, SAS und Luftsystemverbraucher machen deutlich, dass die Auslegung eines flexiblen SAS nur durch eine systemorientierte Betrachtung unter Einbindung aller beschriebenen Subsysteme erfolgen kann. Basis dafür ist die Kopplung zwischen Leistungsrechnung und SAS.

3. SEKUNDÄRLUFTSYSTEME IN DER LEISTUNGSRECHNUNG

Die Modellierung von Gasturbinen mittels der Leistungsrechnung erfolgt unter dem Gesichtspunkt einer gesamtheitlichen Abbildung des Betriebsverhaltens. In der Leistungssyntheserechnung werden die einzelnen Komponenten in modularer Weise zu einem Gesamtsystem verknüpft. Die einzelnen Module geben das physikalische Verhalten einer Komponente als Blackbox wieder. Prinzipiell bedeutet das, dass die für eine Komponente charakteristischen Zustandsgleichungen zwischen dem Moduleintritt und –austritt gelöst werden. Die Eingabe der konkreten Geometrie entfällt daher, Zwischenebenen sind je nach Modellierung nur begrenzt vorgesehen. Dies resultiert in einer weitgehend nulldimensionalen Modellierung. Als Modulinput dienen typischerweise Designparameter und Charakteristiken, die das Komponentenverhalten im Off-Design wiedergeben. Diese werden von oder in Zusammenarbeit mit Fachabteilungen erstellt und basieren auf Testdaten oder Ergebnissen detaillierter Simulationen. BILD 1 stellt beispielhaft das Synthesemodell eines Zweistromtriebwerks dar.

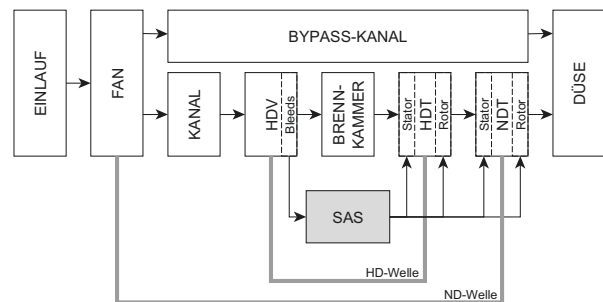


BILD 1. Exemplarisches Synthesemodell eines Zweistromtriebwerks mit gemischter Düse

Auch das SAS wird durch ein Modul wiedergegeben. Um die Komplexität gering zu halten und die numerische Stabilität des Synthesemodells aufrecht zu erhalten, wird das SAS dabei üblicherweise stark vereinfacht. Modelliert werden nur diejenigen Sekundärluftströme, deren Einfluss auf den Kreisprozess nicht vernachlässigt werden kann. Weiterhin werden Strömungspfade geeignet zusammengefasst. Eine Methode zur Integration eines vereinfachten Netzwerkmodells des SAS in die Leistungssyntheserechnung wird beispielsweise in [7] beschrieben. Kühl- und Sperrluft werden der Turbine nur in einer begrenzten Anzahl von Senken zurückgeführt. Für das prinzipiell nulldimensionale Turbinenmodul wird hier häufig ein Ersatzmodell verwendet (BILD 2). Hierbei wird die Turbine als einstufig betrachtet. Dort wird eine Aufteilung der Senkenströme in die Massenströme vorgenommen, die am Turbinenrotor Arbeit verrichten bzw. nicht verrichten (Worksplitt) sowie solche, die kapazitätsbeeinflussend sind oder nicht [8, 9].

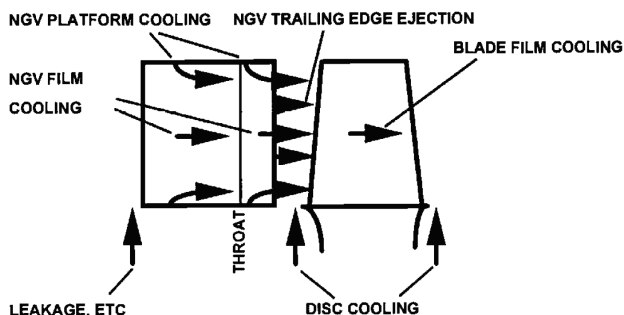


BILD 2. Einstufiges Turbinenmodell [8]

Im Gegensatz dazu erfolgt die detaillierte Simulation des SAS anhand von Netzwerkmodellen. BILD 3 skizziert ein solches Netzwerk. Die hierin berechneten Zustandsänderungen innerhalb der einzelnen Strömungspfade müssen für das Synthesemodell unter Beteiligung beider Fachdisziplinen heruntergebrochen werden. Als Eingabe-größen für das SAS-Modul verbleiben die für die zusammengefassten Strömungspfade repräsentativen Massenströme, Druckverluste und Wärmeübergänge. Bei vorhandener Datenlage ist natürlich auch hier die Bereitstellung entsprechender Charakteristiken zur besseren Abbildung im Off-Design möglich.

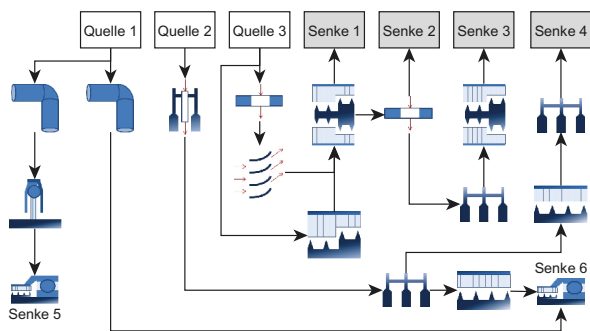


BILD 3. Exemplarische Darstellung des SAS als Netzwerkmodell

Die Krux der beschriebenen Modellierungen des SAS in der Leistungsrechnung besteht in der Abbildung einer festen Geometrie. Demgegenüber sind die repräsentativen Eingabeparameter eines veränderten Luftsystems zunächst unbekannt. Für die Auslegung eines variablen Luftsystems sind die Berücksichtigung der für das Luftsystem relevanten Elemente und deren Durchflussverhalten daher unerlässlich. In [10] wird eine Methode zur direkten Integration einfacher Luftsystemnetzwerke in das Synthesemodell vorgeschlagen. Demgegenüber wird die Kopplung in [4] durch eine parallele Simulation von Synthese- und Netzwerkmodell durchgeführt. Letzteres Vorgehen bietet hinsichtlich einer erhöhten Flexibilität bei der Modellierung und einer von der Synthese völlig unabhängigen Auflösbarkeit der Senken in der Turbine erhebliche Vorteile. Im Folgenden wird deshalb auf Basis von [4] eine Methode vorgestellt, mit der das SAS-Modul in der Leistungsrechnung permanent mit dem Output einer separaten, detaillierten SAS-Simulation aktualisiert wird.

4. MODELLIERUNG

4.1. Physikalische Modelle

Im Folgenden werden das spezifische Synthese- und Netzwerkmodell als zentrale Modelle des gekoppelten Systems vorgestellt. Darüber hinaus macht die Beschaffenheit dieser beiden Einzelmodelle eine Zwischenschaltung von Korrekturen nötig. Zur Abbildung aller die Interaktion beschreibenden Einflüsse sind zudem weitere Einzelmodelle zwischenzuschalten. Nachfolgend werden die verwendeten physikalischen Modelle beschrieben.

4.1.1. Synthesemodell

Das nulldimensionale Synthesemodell setzt sich aus der modularen Verknüpfung der Komponenten sowie deren konkreten, in Kapitel 3 beschriebenen Inputs zusammen. Jeder zu berechnende Betriebspunkt wird durch die Umgebungsbedingungen, beliebige Nebenbedingungen und etwaige Zielgrößen beschrieben, auf die das Modell iteriert wird. Nebenbedingungen können beispielsweise eine mechanische Leistungsentnahme an einer Welle oder das Abzapfen eines bestimmten Sekundärluftmassenstroms sein. Eine Zielgröße kann beispielsweise ein Leistungsregelungsparameter wie Schub, Wellenleistung oder eine Drehzahl sein. Als Input für die Charakteristiken bzw. Kennfelder dienen Größen, die bereits im Prozess generiert oder vom Benutzer vorgegeben wurden. Die Auswertung bringt die spezifischen Austrittsgrößen der jeweiligen Komponente hervor.

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete, vom DLR entwickelte Programm *GTlab* [11] stellt dem Benutzer die Definition beliebiger Quellen in den Verdichtermodulen frei. Da die geometrische Definition der einzelnen Entnahmestellen im nulldimensionalen Verdichtermodule entfällt, erfolgt die Lokalisation über die thermodynamische Zustandsänderung innerhalb des Verdichters. Die Quellen werden dementsprechend über die relative Enthalpieänderung oder relative Temperatur- und Druckänderung definiert. Die Festlegung der Senken innerhalb des Turbinenmoduls erfolgt nach dem bereits erläuterten Ansatz aus [8]. Jedes einstufige modellierte Turbinenmodul stellt für die Rückführung von Massenströmen in den Ringraum vier Senken bereit: Vor und hinter dem Stator sowie vor und hinter dem Rotor. Die im Stator zurückgeführten Massenströme sind demnach die am Rotor arbeit verrichtenden. Die vor einem Gitter eingeblasenen Massenströme sind die im jeweiligen Gitter kapazitätsbeeinflussenden. Das Sekundärluftmodul wird durch die verschiedenen, an den Quellen beginnenden Strömungspfade gebildet, denen als Designparameter oder im Off-Design als Nebenbedingungen Druckverluste und Wärmeübergänge zugewiesen werden können. Die Strömungspfade können ihrerseits aufgeteilt und somit verschiedenen Senken zugewiesen werden. Auch hier sind differenzierte Eingaben zu Druckverlusten und Wärmeübergängen möglich. Die von der Leistungsrechnung generierten, für die SAS-Berechnung relevanten Ausgabegrößen sind die Wellendrehzahlen, Drücke und Temperaturen an den Quellen sowie die Senkendrucke.

4.1.2. SAS-Modell

Das SAS-Modell ergibt sich aus einer Hintereinanderschaltung der einzelnen Luftsystemelemente. Dies

können Rohre, Verzweigungen, Kavitäten und Restriktoren wie z. B. Blenden und Dichtungen sein. Wärmeübergänge können über Wärmeübertrager als Ersatzmodell abgebildet werden. Durch die zum Teil komplexe Aufspaltung der Sekundärluftströme in verschiedene Strömungspfade sowie Zusammenführungen in Kavitäten ergibt sich das beschriebene Netzwerk. Die einzelnen, über Knoten verknüpften Elemente selbst sind ähnlich wie im Synthesemodell nulldimensional. Die physikalische Zustandsänderung zwischen zwei Knoten ergibt sich durch Auswertung von Charakteristiken. Die zur Modellierung verwendete kommerzielle Software *Flowmaster* stellt für eine Vielzahl der in SAS von Gasturbinen gängigen Elemente dimensionslose bzw. quasidimensionale Charakteristiken sowie einen 1D-Löser für geometrisch definierte Kavitäten zur Verfügung. Dem Benutzer steht dabei aber auch die Verwendung eigener, z. B. aus Tests gewonnener, Charakteristiken frei. Die zusätzlichen Eingabeparameter für das Netzwerk beschränken sich daher auf die Dimensionierung der einzelnen Elemente sowie die Vorgabe der Randbedingungen an Quellen und Senken, d.h. Temperaturen sowie Drücke bzw. alternativ Massenströme. Letztere Größen werden innerhalb des gekoppelten Systems von der Syntheserechnung geliefert. Die für die Kopplung relevanten Ausgabeparameter sind die Massenströme an Quellen und Senken sowie Temperaturen der Senkenströme. Außerdem werden Druckverluste und Wärmeübergänge der einzelnen Strömungspfade in einem nachfolgenden Modell als Input für das SAS-Modul im Synthesemodell zusammengefasst.

4.1.3. Thermisches Modell

Die Spalte von Stator-Rotor- und Rotor-Rotor-Dichtungen sind über den Betriebsbereich der Maschine geometrisch veränderlich. Insbesondere Variationen im Radialspalt wirken sich dabei signifikant auf das Durchsatzverhalten aus. Ursache ist die Ausdehnung des Rotors durch Fliehkrafteinfluss und Wärmedehnung. Die Änderung des Dichtungsspalts gegenüber dem Kaltspalt δ_{cold} stellt sich dementsprechend als Funktion der Drehzahl N und Materialtemperaturen der gegeneinander abgedichteten Bauteile dar. Die aus mechanischer und thermischer Dehnung kumulierte Spaltänderung $\Delta\delta$ kann beispielsweise in thermomechanischen FEM-Analysen ermittelt werden. Bei bekannter Turbinengeometrie und bereits ausreichend vorhandenen Simulations- oder Testdaten ist der Effekt über Korrelationen abbildbar. Um eine Abhängigkeit zum Betriebspunkt herzustellen, wird $\Delta\delta$ als Funktion von N , T_4 und der Temperatur im jeweiligen Strömungspfad T_{SAS} dargestellt (Gleichung 1).

$$(1) \Delta\delta = f(N, T_4, T_{SAS})$$

Ein weiterer, für das SAS wichtiger Effekt ergibt sich aus dem Wärmestrom \dot{Q} vom Material auf das Fluid: Die Sekundärluftströme werden durch die heißen Festkörperstrukturen wie z. B. Turbinenscheiben aufgeheizt. Der veränderte thermodynamische Zustand ist sowohl für die Berechnung des Durchsatzverhaltens der Restriktoren, als auch für die Kühlwirkung nachfolgender Bauteile von Bedeutung. Auch dieser Effekt kann prinzipiell durch FEM basierte Wärmeübergangsrechnungen oder Korrelationen mit T_4 als Variable beschrieben werden.

Beide Effekte, sowohl Rotorspaltänderung als auch Wärmeübergang, können gemeinsam in einem thermischen Modell zusammengefasst werden. Als

Eingabeparameter dienen die aus der Syntheserechnung bereitgestellten Drehzahlen und T_4 . Das thermische Modell liefert dem Netzwerkmodell die neue Spaltgeometrie sowie die zur Wärmeübergangsberechnung notwendige Scheibentemperatur T_{disk} . Auf diese Weise bilden thermisches und SAS-Modell einen internen iterativen Prozess, bei dem als Stellgröße für das thermische Modell T_{SAS} dient und die Konvergenz der Spaltgeometrie mit $\Delta\delta$ als Abbruchkriterium dient. Die erweiterte thermomechanische Modellierung mittels einer FE-Methode würde für die Wärmeübergänge zwischen Festkörper und Fluid mit dem jeweiligen T_{SAS} eine weitere Stellgröße sowie eine zugehörige geeignete Fehlergröße erforderlich machen.

4.1.4. Korrektur der Luftentnahmestellen

Die Luftentnahmestellen im Verdichter sind geometrisch fixiert. Durch das Betriebsverhalten des vielstufigen Verdichters variiert allerdings die relative thermodynamische Zustandsänderung an den einzelnen axialen Positionen. Die im Synthesemodell vorgenommene Lokalisation der Sekundärluftentnahme muss daher im Off-Design korrigiert werden. Bei einer bekannten Verdichtergeometrie kann dies mit dem Einsatz von Zwischenkennfeldern geschehen. Hier werden die geforderten Größen, also statische Drücke und Temperaturen, in Abhängigkeit des Verdichterdruckverhältnisses Π_{HDV} charakterisiert (Gleichungen 2 und 3).

$$(2) p_{bleed} = f(\Pi_{HDV})$$

$$(3) T_{bleed} = f(\Pi_{HDV})$$

Zur Abbildung der Sekundärluftströme bei bekannter Geometrie sowie für erste Abschätzungen zum Einsparpotenzial variabler Sekundärluftströme ist dieses Modell ausreichend. Für die umfassende Auslegung eines Luftsystems mit angepassten Luftentnahmen ist die Berücksichtigung der Verdichtergeometrieänderung allerdings zwingend notwendig. Dies erfordert die Anpassung der Zwischenkennfelder. Hierfür eignet sich der Einsatz einer Verdichtermittelschnittrechnung. Die Anwendbarkeit eines solchen Korrekturverfahrens wird, wenngleich unter anderer Zielsetzung, in [12] diskutiert.

4.1.5. Korrektur des Turbinenwirkungsgrades

Bei der Rückführung der Kühl- und Dichtluft in die Turbine entstehen Mischungsverluste. Diese werden über eine Korrektur des Turbinenwirkungsgrads berücksichtigt. Dazu können die einzelnen Senkenmassenströme je nach Aufgabe und Einsatzort in Kategorien aufgeteilt werden [13]. Für eine bekannte Turbinengeometrie wird jeder Kategorie eine Austauschrate $\Delta\eta_{turb}$ zugeordnet, die die Wirkungsgradverschlechterung linear als Funktion des Verhältnisses zwischen Senkenmassenstrom und Kernmassenstrom ausdrückt (Gleichung 4).

$$(4) \Delta\eta_{turb} = f(\dot{m}_{sink} / \dot{m}_4)$$

4.1.6. Senkenkonvertierung

Im nulldimensionalen Synthesemodell ist nur eine begrenzte Anzahl an Senken im Turbinenmodul vorgesehen. Im SAS-Modell ist aber eine detailliertere Aufteilung der Senkenmassenströme erforderlich. Im Zuge der Parameterübergabe zwischen Synthese- und SAS-Modell müssen die Senken daher höher aufgelöst werden bzw. im Gegenzug zusammengefasst werden. Die Aufteilung der thermodynamischen Randbedingungen

aus dem Turbinenmodul erfolgt über die Verwendung von Charakteristiken, die den Abfall des Drucks in Richtung der Meridionalkomponente als Funktion des Turbinengitters wiedergeben.

Die Zusammenfassung der Senkenmassenströme aus dem SAS-Modell erfolgt über den Worksplit. Dabei wird jeder Senkenmassenstrom einer Kategorie im einstufigen Turbinenmodell zugeordnet [4]. Die kumulierten Massenströme jeder Kategorie werden dann als Eingabeparameter der jeweiligen Senke im Synthesemodell vorgegeben.

4.1.7. Iterative Prozesse

Aus den vorgestellten Einzelmodellen ergibt sich ein komplexes gekoppeltes System, das nur iterativ gelöst werden kann (BILD 4). Es lässt sich dabei in einen inneren und äußeren iterativen Prozess aufteilen. An den zwischen den Modellen dargestellten Kanten sind die jeweiligen für die Kopplung relevanten Ausgabe- parameter eines Modells angegeben.

Die Simulation erfolgt getrennt für jeden Betriebspunkt. Nach der Initialisierung des Betriebspunkts wird die Syntheserechnung gestartet. Ausgabeparameter für nachfolgende Modelle sind die Drehzahlen, Quendrucke und -temperaturen, Senkendrucke (sink) sowie der Massenstrom am Turbineneintritt. Die Senkendrucke werden für das SAS-Modell konvertiert. Repräsentative, nulldimensionale Parameter sind in BILD 4 dabei durch den Kopfzeiger (*) gekennzeichnet. Die übrigen Parameter können ohne Konvertierung als Input für SAS- und thermisches Modell verwendet werden. Es schließt sich der innere iterative Prozess an (s. Kapitel 4.1.3). Im weiteren Verlauf wird die Austauschrate für den Turbinenwirkungsgrad berechnet und die Zusammenfassung der Luftsystemparameter für das SAS-Modul in der Synthese durchgeführt. Solange die Eingabeparameter des SAS-Moduls in der Synthese nicht konvergiert sind, liefert der Optimierer hierfür Schätzwerte. Vor dem erneuten Start der Syntheserechnung erfolgt die Anpassung der Luftentnahmestellen anhand des berechneten Π_{HDV} . Bei beiden iterativen Prozessen handelt es sich um ein mehrdimensionales Optimierungsproblem. Die Qualität der gefundenen Lösung sowie die benötigte Anzahl an Iterationsschritten hängt maßgeblich von der geeigneten Auswahl und Konfiguration der Optimierungsalgorithmen ab. Die Anforderungen an das Optimierermodul sind daher die Anschlussfähigkeit verschiedenartiger Algorithmen sowie deren parallele Ausführbarkeit innerhalb eines gekoppelten Systems.

4.2. Implementierung

Die Verknüpfung der Modelle zu einem gekoppelten System erfolgt innerhalb einer neu entwickelten Simulationsumgebung. Verwendet wird hierfür die javabasierte Entwicklungsplattform *Netbeans*. Der grundsätzliche Aufbau der Simulationsumgebung sieht die Implementierung der einzelnen Modelle in Modulen vor, welche einem Kernprozess zugeschaltet werden. Im Kernprozess selbst erfolgt die Konfiguration zu einem gekoppelten System. Weiterhin erfolgen hier der Simulationsablauf und die Kontrolle des Datenaustauschs zwischen den einzelnen Modulen. Bei der Gestaltung der Module finden die Prinzipien objektorientierter Programmierung wie Vererbung und Abkapselung vielfältige Anwendung.

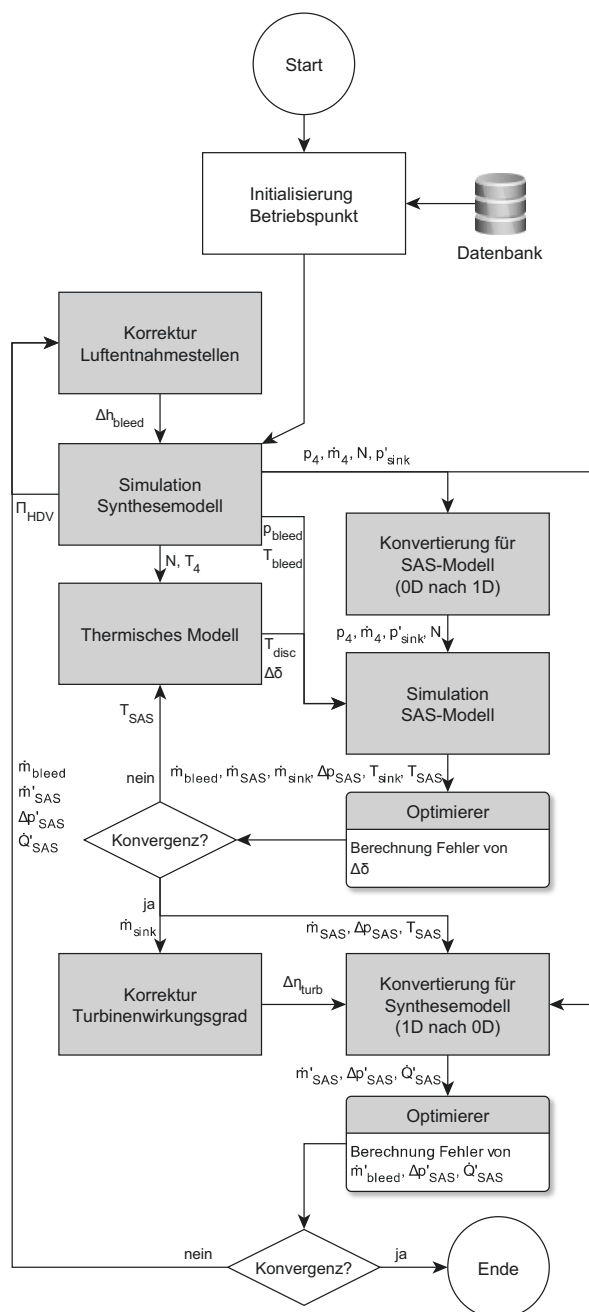


BILD 4. Flussdiagramm des gekoppelten Systems bei Berechnung eines Betriebspunktes

4.2.1. Schnittstellenkonzept

Um das Modell für verschiedene Einsatzformen von Gasturbinen verwenden zu können, stellt die Flexibilität bezüglich der Auswahl der eingesetzten Simulationssoftware eine wichtige Anforderung an die Implementierung dar. Die in 4.1 vorgestellten Programme zur Synthese- und SAS-Modellierung können prinzipiell durch andere kommerzielle oder firmeninterne Software ersetzt werden. Aus diesem Grund interagiert der Kernprozess mit jedem Modell über eine generische Schnittstelle. In der generischen Schnittstelle sind die Prozessschritte definiert, welche für die Ausführung in der jeweiligen Disziplin charakteristisch sind. Hier werden auch Funktionalitäten implementiert, die von der verwendeten Software unabhängig sind. Alle anderen,

programmspezifischen Methoden müssen in einer spezifischen Schnittstelle umgesetzt werden. Für die Benutzung einer anderen Software muss daher nur die spezifische Schnittstelle programmiert werden. Das generische Konzept verringert somit den allgemeinen Implementierungsaufwand, liefert eine klare Definition der vorzunehmenden Implementierungsschritte und gewährleistet die Unabhängigkeit des Kernprozesses von der verwendeten Software.

BILD 5 veranschaulicht das Schnittstellenprinzip anhand der Leistungsrechnung, des SAS und eines beliebigen zusätzlichen Moduls: Die spezifischen Schnittstellenmodule, die die Implementierung der konkret verwendeten Modelle bzw. Software enthalten, beerben das der jeweiligen Disziplin zugehörige generische Modul. Letzteres ist beim Kernprozess registriert, kann von diesem aufgerufen werden und mithilfe von Benutzer-einstellungen (z. B. der Vorgabe der entsprechenden Software) spezifiziert werden. Der Zugriff auf ein spezifisches Modul erfolgt dementsprechend immer über den Zwischenweg der generischen Schnittstelle. Darüber hinaus greifen alle Module auf ein gemeinsames Hilfsmodul zurück, das verschiedenartige Werkzeuge sowie die vom Kernprozess verwendete Datenstruktur bereitstellt.

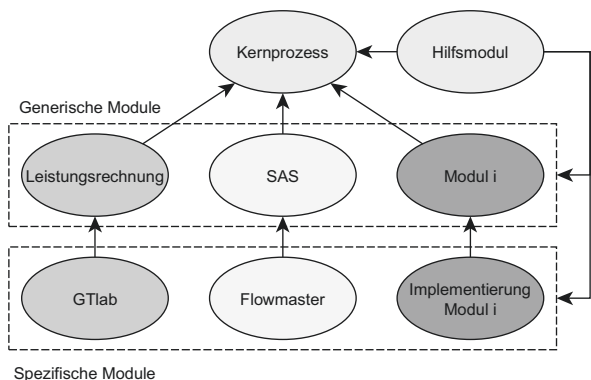


BILD 5. Schnittstellenprinzip und Modulanbindung in der Simulationsumgebung

Spezifische Schnittstellen beschränken sich nicht allein auf komplette externe Softwarepakete, sondern können ebenso direkte Modellimplementierungen innerhalb eines Javamoduls oder Schnittstellenadapters (Wrapper) zu Bibliotheken sein.

Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts besteht in der sich hieraus ergebenden Flexibilität beim Modellierungsumfang. So kann z. B. das thermische Modell bei Bedarf von einer korrelationsbasierten Berechnung der Rotor-spalte und Wärmeübergänge auf eine komplexe thermo-mechanische FE-Analyse umgestellt werden. Das gekoppelte System bleibt dabei formell quasi identisch.

4.2.2. Gekoppeltes System

Die Konfiguration des gekoppelten Systems setzt sich aus der Prozessstruktur sowie einer Liste mit zwischen den Modellen vorherrschenden Übergangsbedingungen zusammen.

In der Prozessstruktur werden die Module in ihrem logischen Ablauf verknüpft. Sequenzielle Abläufe werden in einer Prozesskette zusammengefasst. Überall dort, wo innere Iterationen stattfinden, wird in die Prozesskette ein Optimiermodul eingesetzt. Dem Optimiermodul selbst wird sodann eine weitere Prozesskette zugeteilt, die die

an der Iteration beteiligten Module enthält (BILD 6). Auf diese Weise ist eine beliebige Verschaltung iterativer Abläufe möglich.

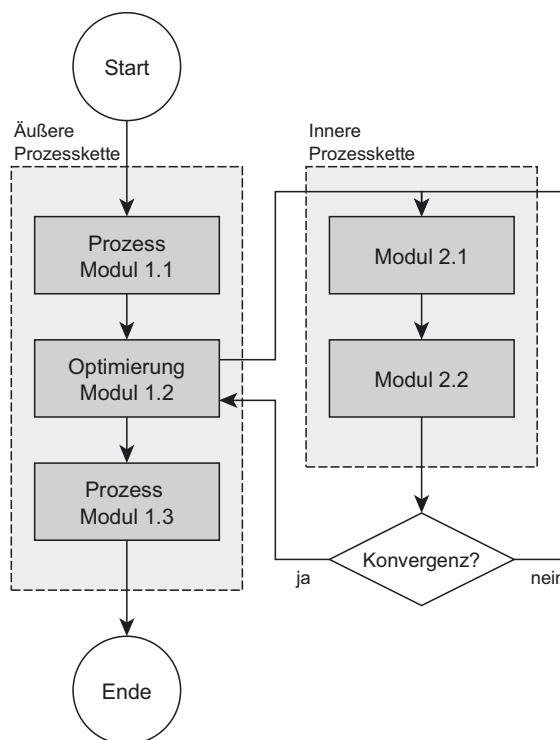


BILD 6. Prozessstruktur mit äußerer und innerer iterierender Prozesskette

Die Übergangsbedingungen werden in einer von allen Modulen zugreifbaren Liste gespeichert. Dabei wird vom Benutzer im Vorfeld der gekoppelten Simulation vorgegeben, welche Modelle miteinander interagieren und welche die jeweiligen Eingabe- und Ausgabeparameter sind. Jeder Übergangsbedingung wird dabei genau ein Modul zugewiesen, das den Wert der Übergangsbedingung vorgibt. Auf der anderen Seite werden ein oder mehrere Module registriert, die als Klienten agieren und ihren Input anhand des gesetzten Werts aktualisieren. Die in der Prozesskette an jedem Modul abzuarbeitenden Schritte lassen sich daher in Preprocessing, Simulations-durchführung und Postprocessing unterteilen (BILD 7). Der Kernprozess prüft für jedes Modul, bei welchen Übergangsbedingungen es als Klient angemeldet ist und fasst den zu verändernden Input in einer vereinheitlichten Datenstruktur zusammen. Diese wird an die spezifische Schnittstelle übergeben und dort zum programm-spezifischen Input bzw. in entsprechenden Kommandos verarbeitet. Dem Preprocessing folgt die Durchführung der Simulation. Nach Abschluss der Simulation wird im Postprocessing wiederum geprüft, welche Übergangsbedingungen mit dem Moduloutput aktualisiert werden. Analog zum Preprocessing wird hierzu die spezifische Ausgabe in eine vereinheitlichte Datenstruktur übertragen, an den Kernprozess übergeben und dort als neuer Input für die Übergangsbedingungen verarbeitet.

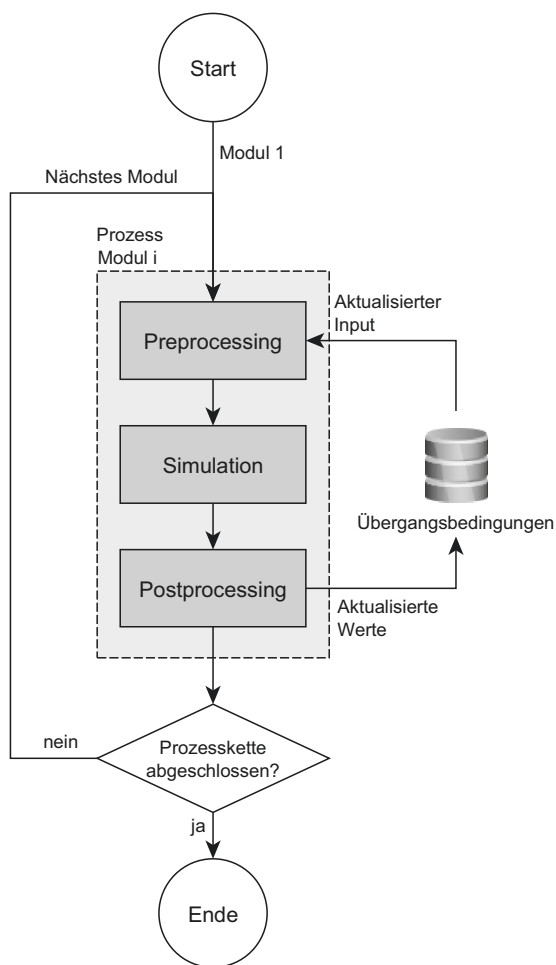


BILD 7. Arbeitsschritte des Moduls innerhalb einer Prozesskette

Der Kernprozess ist somit ebenfalls generisch. Dies ermöglicht eine Verwendung für Problemstellungen, die über die vorgestellte Kopplung zwischen Leistungsrechnung und SAS-Modellierung hinausgehen. Die Architektur der Simulationsumgebung begünstigt darüber hinaus die Einbettung weiterer Fachdisziplinen für erweiterte Anwendungen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zwischen dem Kreisprozess und SAS von Gasturbinen bestehen vielseitige Interaktionen. Zur Auslegung eines flexiblen Luftsystems wurde eine Methode vorgestellt, die die detaillierte Modellierung des SAS mit der Modellierung der Gasturbine als Gesamtsystem verbindet. Die für das SAS maßgeblichen Effekte wurden dabei durch eine geeignete Modellierung in das gekoppelte System integriert. Die hierfür entwickelte Simulationsumgebung bietet dabei Spielraum zur einfachen Erweiterung der Methode. Dies ermöglicht den Einsatz verbesserter Modellimplementierungen, die Verwendung anderer Software und die Ergänzung weiterer Modelle bzw. Disziplinen für erweiterte Aufgabenstellungen. Der nächste Arbeitsschritt erfordert den Aufbau des vollständig gekoppelten Systems einer Referenzmaschine und dessen Validierung anhand verfügbarer Daten aus Messungen und Simulationen.

Zur Bewertung der Auswirkungen veränderter Sekundärluftmassenströme auf andere Komponenten, die Luftsystemverbraucher und die Lebensdauer kritischer Bauteile ist die Erstellung weiterer Modelle notwendig. Die Bewertung der Auswirkungen veränderter Sekundärluftströme auf Gesamtsystembasis muss durch weitere Modelle erfolgen, die die Untersuchung folgender Themenpunkte ermöglichen:

- Stabilitätsverhalten des Verdichters
- Kühlung und veränderte Strömungsführung in der Turbine
- Erfüllung der Anforderungen aller Luftsystemverbraucher, insbesondere der Heißgas- und Lagerkammerabdichtung sowie Lagerlastkontrolle
- Änderung der Lebensdauer kritischer Bauteile

Diese Modelle sind in die Simulationsumgebung zu integrieren. Darauf aufbauend kann die Simulation eines flexiblen SAS durch die Integration einer entsprechenden Regelung realisiert werden. Im Umkehrschluss würde die Auslegung eines solchen Systems zum einen ein zusätzliches Modul erforderlich machen, das die entsprechenden Regelgesetze formuliert. Zum anderen wäre ein Netzwerkoptimierer nötig, der die einzelnen Luftsystemquellen, -elemente und ggf. auch deren Charakteristiken derart austauscht, dass die zuvor definierten, anwendungsspezifischen Kriterien an Wirkungsgrad, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer getroffen werden.

Auf dieser Basis ist die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Strömungsregulierung möglich. Die Verifikation des erstellten flexiblen Luftsystems erfolgt im letzten Schritt durch die Integration der Ventilregelung (stationäre Applikation) bzw. Fluidics (fliegende Applikation) in das Modell.

6. DANKSAGUNG

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Verbundvorhabens COORETEC-turbo (AG Turbo 2020) der AG Turbo durchgeführt und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03ET2013P gefördert. Die Autoren danken der AG Turbo und Rolls-Royce Deutschland für die Unterstützung und die Erlaubnis zur Veröffentlichung. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

Die Autoren bedanken sich besonders bei Michael Klingsporn für die Koordination des Projekts seitens Rolls-Royce Deutschland. Ein großer Dank gilt Martin Bolemant, Silvio Chemnitz und Jonas König für ihr Mitwirken am Projekt und die anregenden, fachlichen Diskussionen zur Modellierung.

7. LITERATUR

[1] L. Bozzi, E. D'angelo: 'Numerical and Experimental Investigation of Secondary Flows and Influence of Air System Design on Heavy-Duty Gas Turbine Performance', ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68392, Copenhagen, 2012.

[2] P. Nag, D. Little, A. Plant, D. Roth: 'Low Load Operational Flexibility For Siemens F- & G-Class Gas Turbines', ASME Turbo Expo 2010, GT2010-22055, Glasgow, 2010.

[3] D. Peitsch: 'Missionsabhängige Anpassung des Sekundärluftsystems zur Verbesserung der

- Triebwerksleistung', DGLR Kongress 2010, DLRK 2010-1214, Hamburg, 2010.
- [4] P. Zeller: ‚Effizienzsteigerung von Turbofluchtstrahltriebwerken durch Optimierung des sekundären Luftsystems‘, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008.
- [5] B. Koli, J.W. Chew, N.J. Hills, T. Scanlon: ‚CFD Investigation of a Fluidic Device for Modulation of Aero-Engine Cooling Air‘, ASME Turbo Expo 2014, GT2014-26221, Düsseldorf, 2014.
- [6] K. Foster, G.A. Parker: ‚Fluidics. Components and Circuits‘, Wiley-Interscience, London, 1970.
- [7] R. S. Merkler, S. Staudacher, K.-J. Schmidt: ‚Modellierung des Luftsystems von Turbofluchttriebwerken für die Anwendung in Leistungssyntheseprogrammen‘, DGLR Kongress 2003, DGLR-2003-014, München, 2003.
- [8] J. Kurzke: ‚Performance Modeling Methodology: Efficiency Definitions for Cooled Single and Multistage Turbines‘, ASME Turbo Expo 2002, GT-2002-30497, Amsterdam, 2002.
- [9] P. P. Walsh, P. Fletcher: ‚Gas Turbine Performance‘, Blackwell Publishing, Oxford, 2004.
- [10] A. Alexiou, K. Mathioudakis: ‚Secondary Air System Component Modelling For Engine Performance Simulations‘, ASME Turbo Expo 2008, GT2008-50771, Berlin, 2008.
- [11] R. Becker, F. Wolters, M. Nauroz, T. Otten: ‚Development of a Gas Turbine Performance Code and its Application to Preliminary Engine Design‘, DGLR Kongress 2011, DLRK 2011-241485, Bremen, 2011.
- [12] M. Bolemant: ‚An Alternative Compressor Modeling Method Within Gas Turbine Performance Simulations‘, DGLR Kongress 2014, DLRK 2014-340047, Augsburg, 2014.
- [13] S. Staudacher: ‚Untersuchungen zum sekundären Luftsystem von Luftstrahltriebwerken‘, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1995.