

MODELLIERUNG DES LUFTSYSTEMS VON TURBOFLUGTRIEBWERKEN FÜR DIE ANWENDUNG IN LEISTUNGSSYNTHESEPROGRAMMEN

R. S. Merkler, S. Staudacher, K.-J. Schmidt*

Institut für Luftfahrtantriebe
Universität Stuttgart

* MTU Aero Engines GmbH
Dachauer Straße 665
80995 München

ÜBERSICHT

Der Kühlung von Turbinen kommt mit steigender Brennkammeraustrittstemperatur, wie sie tendenziell bei Turboflugtriebwerken zu sehen ist, immer größere Bedeutung zu. Die Modellierung der komplexen Kühlluftsysteme moderner Turboluftstrahltriebwerke in Leistungssyntheseprogrammen reflektiert jedoch deren Betriebsverhalten nur näherungsweise. Im Gegensatz dazu werden heute hohe Ansprüche an eine Simulationemethode hinsichtlich ihrer Genauigkeit gestellt, um die Entwicklungskosten zu reduzieren. Im Folgenden wird daher die Erstellung eines Berechnungsmoduls zur Anwendung in einem Leistungssyntheseprogramm beschrieben, welches eine flexible Darstellung verschiedener Luftsysteme und eine geeignete Berücksichtigung ihres Betriebsverhaltens in der Leistungssyntheserechnung erlaubt. Zunächst wird eine Systematik zur Abstraktion detaillierter Luftsysteme mit dem Ziel der Anwendung in der Leistungssynthese abgeleitet und an einem konkreten Beispiel vorgeführt. Daran anschließend werden einige Varianten zur Darstellung der Strömungselemente des abstrahierten Systems diskutiert. Das Vorgehen bei der iterativen Lösung der Gleichungen, sowie einige Beispielrechnungen werden vorgestellt. Abschließend wird die Vorgehensweise bei der Kopplung der Luftsystem- und Leistungssyntheserechnung gezeigt.

BEZEICHNUNGEN

A	Fläche
AP	Auslegungsbetriebspunkt
BK	Brennkammer
c_p	spez. Wärmekapazität
E	Leitungswiderstand
HPC	Hochdruckverdichter
HPT	Hochdruckturbine
k	Knotenanzahl
K_f	Faktor für Wirbelstärke
k_1	Temperaturkoeffizient
LPC	Niederdruckverdichter
LPT	Niederdruckturbine
\dot{m}	Massenstrom
$\dot{m}_{red.}$	reduzierter Massenstrom
Ma	Machzahl
OD	Off-Design Betriebspunkt
ζ	Widerstandsbeiwert
p	statischer Druck
p_t	Totaldruck
R	spezifische Gaskonstante

r	Radius
T	statische Temperatur
T_t	Totaltemperatur
v	Geschwindigkeit
w	Geschwindigkeit; Massenstrom
ρ	Dichte
φ	Geschwindigkeitskoeffizient
ϕ	Durchflußfunktion
κ	Isentropenexponent
ω	Winkelgeschwindigkeit

Fußzeiger

eq.	äquivalent
a	Außen
i	Innen, Zählindex
o	Ort der Kühlluftausblasung
s	isentrop
n	polytrop

1. EINLEITUNG

Die Kühlluftsysteme moderner Turboflugtriebwerke sind durch komplexe Strömungsführungen gekennzeichnet. Hierbei wird die Kühlluft sowohl durch Rohrleitungen zu ihrer Zuführstelle geführt, als auch im Inneren des Triebwerks durch Bauteile, wie Düsen, Blenden, Dichtungen und rotierende Scheiben, die unterschiedlichste Widerstandscharakteristika besitzen. Neben den damit verbundenen Strömungseffekten erhält der Wärmeaustausch zwischen Struktur und Sekundärluft immer größere Bedeutung.

Die Sekundärluft dient dabei mehreren Zwecken. Neben der Kühlung der Struktur sind die Abdichtung des Gaskanals, die Abdichtung der Lagerkammern, die Einstellung des Lagerschubes und die Spaltkontrolle die wesentlichsten Aufgaben. Das Sekundärluftsystem ist daher ein vitaler Bestandteil bei der Gewährleistung der erforderlichen Lebensdauer, des Wirkungsgrades der Turbokomponenten und des sicheren Betriebes von Turboluftstrahltriebwerken.

2. MODELLIERUNG

Zur Berechnung dieser komplexen Systeme ist es üblich, als Modell ein Netzwerk aus Knoten und Leitungen zu wählen, dessen Knoten die Kammern und dessen Verbindungen die Strömungswege des Luftsystems repräsentieren [3]. Den Leitungen werden, entsprechend der Strömungsführung und den darin vorhandenen Bauteilen, unterschiedliche Druckverlustkorrelationen zugeordnet. In den Knoten werden die Erhaltungsgleichungen für Energie

und Masse aufgestellt. Um eine thermische und strömungstechnische Auslegung eines solchen Systems zu ermöglichen, wird eine möglichst detaillierte Darstellung angestrebt, die zu großen und komplexen Netzwerksystemen führt. Die Definition der Randbedingungen unter denen das so modellierte System in einem bestimmten Betriebspunkt des Triebwerks arbeitet, erfolgt mit Hilfe von Daten aus der Triebwerksleistungsberechnung.

Die Lösung des so entstandenen nichtlinearen Systems erfordert eine aufwendige iterative Vorgehensweise, zu deren Lösung umfangreiche Rechenprogramme notwendig sind [3], [9]. Auf Grund der unterschiedlich großen Einflüsse der einzelnen Strömungselemente auf das gesamte System ist die numerische Lösung mitunter schwierig.

3. MODELLIERUNGSKONZEPT

Im Sinne einer Simulation des Gesamtsystems wird eine integrierte Berechnung von Triebwerksleistung und Sekundärluftsystem angestrebt. Diese erfordert jedoch hinsichtlich der stabilen numerischen Lösung und eines der Leistungsrechnung angepassten Berechnungsaufwandes eine vereinfachte Darstellung des sekundären Luftsystems. Die Abstrahierung soll jedoch nur so weit vorgenommen werden, dass die für das Betriebsverhalten eines Luftsystems wichtigen Charakteristika erfasst werden können.

3.1. Systematik zur Abstraktion detaillierter Luftsysteme

Die detaillierte Modellierung eines internen Luftsystems führt zu Strömungselementen mit stark differierenden Durchsätzen, die zu den in 2. genannten numerischen Problemen führen. Um eine stabile Berechnung des integrierten Systems zu erreichen, ist daher die Modellierung so weit zu vereinfachen, dass das Betriebsverhalten des Luftsystems mit ausreichender Genauigkeit erhalten bleibt und ein numerisch ausgeglichenes System entsteht. Dabei ist auch auf den Einfluss der an die Luftführung angrenzenden Bauteile zu achten, da diese durch Wärmeübertragung und Rotation der Kühlluft Energie zuführen können.

Aus diesen Überlegungen heraus werden in einem ersten Abstraktionsschritt Leitungen, deren Luftmassendurchsätze im Vergleich zu den anderen vorkommenden Massenströmen sehr gering sind, aufgrund ihrer zu vernachlässigenden Auswirkung auf das Gesamtsystem, in der Berechnung nicht berücksichtigt. Das so reduzierte Netzwerk ermöglicht eine schnelle und numerisch robuste Rechnung.

Ein weiterer Abstraktionsschritt kann durch die Aufteilung des Luftsystems in mehrere Untersysteme erfolgen. Dabei können Teilgebiete des Systems, die durch sehr wenige Leitungen untereinander verbunden sind, durch Trennung dieser Leitungen zu Untersystemen mit günstigerem numerischem Lösungsverhalten abstrahiert werden. Anstelle der Verbindungsleitungen werden auf halbem Druckgefälle „imaginäre“ Kopplungsknoten eingeführt, die den beteiligten Untersystemen als Randbedingungen dienen. So kann eine zu der Leistungssyntheserechnung passende Darstellung des Luftsystems durch dessen Aufteilung in Nieder- und Hochdruckluftsystem stattfinden.

Analog zu der Vorgehensweise bei der Berechnung elektronischer Netzwerke findet als weitere Abstraktion eine Zusammenfassung von Reihen- und Parallelschaltungen

der durchströmten Leitungen statt. Dabei verhalten sich die strömungsmechanischen Größen analog zu den elektrotechnischen (das Druckgefälle entspricht der Spannung, der Massendurchsatz entspricht dem Strom), womit auch die Rechenregeln bei der Zusammenfassung von Netzwerken übernommen werden können [4]. Bei Reihenschaltungen werden daher die Druckverluste der einzelnen Leitungen addiert (Gl. (1)). In diesem Falle ist der Massenstrom in jeder Leitung gleich groß und entspricht dem der zusammengefassten Leitungen in Reihe (Gl. (2)).

$$(1) \Delta p = \sum \Delta p_i$$

$$(2) \dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_i$$

Im Falle einer Parallelschaltung ist der Druckverlust zwischen zwei Knoten für alle Leitungen gleich groß (Gl. (3)). Bei Zusammenfassung von Parallelschaltungen addieren sich die Einzelmassenströme zu dem Gesamtmassenstrom (Gl. (4)).

$$(3) \Delta p = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_i$$

$$(4) \dot{m} = \sum \dot{m}_i$$

Diese Vorgehensweise kann nach Bedarf auch invertiert werden. Somit kann eine Leitung zwischen zwei Knoten in zwei parallele Leitungen mit gleichem Druckgefälle aufgeteilt werden (BILD (1)).

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise ist es möglich, die Darstellung eines internen Luftsystems beliebig stark zu abstrahieren. Im Grenzfall führt dies zu unvernetzten Einzeleleitungen, die jeweils eine Abzapfstelle und eine Rückführstelle miteinander verbinden. Dieser Grenzfall ist in mehreren Arbeiten beschrieben worden [7], [8]. Andere Autoren ziehen für ihre Berechnungen Luftsysteme heran, die nicht so stark abstrahiert sind [1], [10].

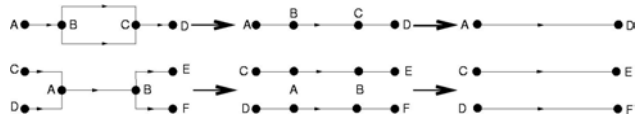


BILD 1. Vereinfachung von Netzwerken

Im Folgenden wird ein Maß an Vereinfachung für das interne Luftsystem moderner Turboluftstrahltriebwerke vorgestellt, das sowohl eine stabile numerische Berechnung erlaubt als auch ausreichend genau detailliert ist, um als Basis für die Berechnung von Wärmeübergängen und Spaltänderungen zu dienen.

3.2. Vereinfachung des internen Luftsystems

In Bild (2) ist das interne Luftsystem eines modernen Turboluftstrahltriebwerks in Form eines Netzwerkes schematisch wiedergegeben. Die Komponenten des Triebwerks sind als gestrichelte Symbole dargestellt.

Der erste Schritt der Abstraktion, die Trennung des Luftsystems zur Kühlung der Nieder- und Hochdruckkomponenten, ist bereits vollzogen. Dazu ist lediglich die Einführung zweier imaginären Koppelknoten notwendig, durch die die Leitungen, welche die beiden Systeme verbinden,

ersetzt werden.

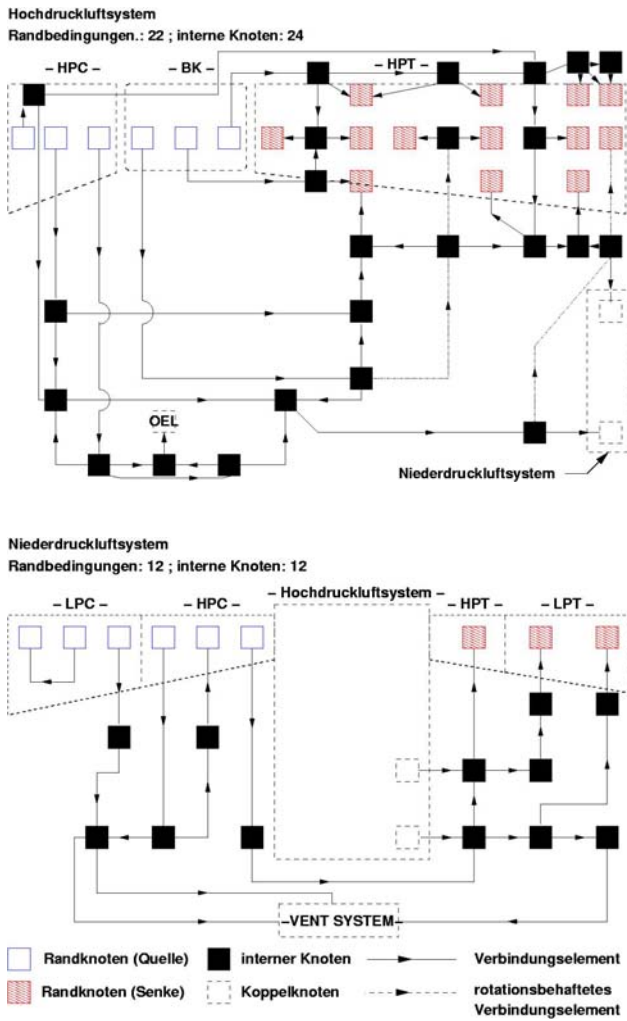


BILD 2. Netzwerk eines Luftsystems (in zwei Untersystemen unterteilt)

In den folgenden Abstraktionsschritten werden Leitungen mit geringem Luftmassenstrom vernachlässigt und Reihen- und Parallelschaltungen zusammengefasst. Das Ergebnis dieser Abstraktion ist in BILD (3) zu sehen. Da nach der Vernachlässigung der Leitungen mit geringem Luftmassenstrom das Hochdruckluftsystem in zwei Untersysteme ohne direkte Verbindung aufgeteilt werden kann, entstehen insgesamt drei Untersysteme, von denen zwei über eine Verbindung gekoppelt sind.

Bei der Vereinfachung des Luftsystems ist eine Einschränkung zu beachten: Leitungen, in denen eine durch rotierende Scheiben hervorgerufene Pumpwirkung herrscht, können nicht mit Leitungen ohne Pumpwirkung zusammengefasst werden, da bei einer solchen Kombination die vereinfachte Berechnung des Durchsatzverhaltens nach Kap. 3.3 nicht immer möglich ist.

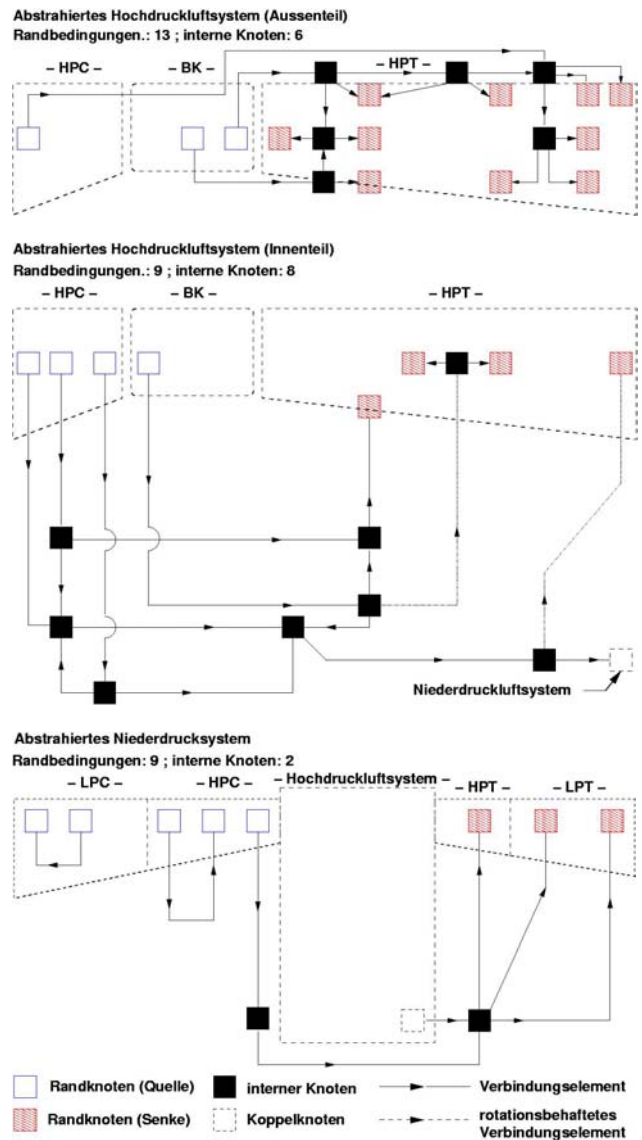


BILD 3. Abstrahiertes Netzwerk eines Luftsystems (in drei Untersysteme unterteilt)

3.3. Modellierung der Leitungen eines Luftsystems

Das physikalische Verhalten einer Leitung zwischen zwei Knoten des abstrahierten Luftsystems wird von mehreren Autoren mit Hilfe der Druckverlustbeziehung für die inkompressible Strömung in einem Rohr konstanten Querschnitts modelliert [7], [10]. Dabei wird der Totaldruckverlust der Rohrleitung über einen Widerstandsbeiwert ζ mit dem Massenstrom in Beziehung gesetzt.

$$(5) \quad \Delta p_t = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot \rho \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \right)^2$$

Wird hierbei der Einfluss der Reynoldszahl auf den Druckverlustbeiwert ζ vernachlässigt, ergibt sich der Massenstrom in einem neuen Betriebspunkt 2 somit aus Angaben des alten und neuen Betriebspunktes wie in Gl. (6) dargestellt.

$$(6) \dot{m}_2 = \sqrt{\dot{m}_1 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Delta p_{t2}}{\Delta p_{t1}}}$$

Darauf aufbauend wird für die im Weiteren vorgestellte Berechnung die Definition eines Leitungswiderstandes E verwendet, in dem alle konstanten Größen aus Gl. 5 (ζ , ρ und A) eingehen und der über den Betriebsbereich als konstant angenommen wird.

$$(7) \Delta p_{t1} = E \cdot \dot{m}_1^2$$

$$(8) \dot{m}_2 = \sqrt{\frac{\Delta p_{t2}}{E}}$$

Die Einschränkungen dieser Modellierung sind:

- Inkompressible Strömung.
- Re-Zahl Effekte auf den Verlustbeiwert werden nicht berücksichtigt.
- Es findet keine Berücksichtigung der Temperatur statt.

Für Verbindungselemente, deren Strömungsverhalten durch die Kompressibilität des Fluids wesentlich beeinflusst wird, basiert die Durchsatzberechnung auf der Ausflussfunktion ϕ für eine isentrope Strömung.

$$(9) m_{red} = \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{T_t}}{p_t \cdot A} = f\left(\kappa, R, \frac{p_t}{p}\right)$$

$$(10) f\left(\kappa, R, \frac{p_t}{p}\right) = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{R \cdot (\kappa - 1)}} \cdot \Phi\left(\frac{p_t}{p}\right)$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{R \cdot (\kappa - 1)}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_t}{p}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_t}{p}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}$$

Bei dieser Modellierung wird von einer Entspannung des Gases aus einem Kessel mit dem Ruhedruck p_{t1} auf den Gegendruck p_2 ausgegangen. Da bei der Berechnung der Knotendrucke eines Luftsystems von einer vernachlässigbaren Strömungsgeschwindigkeit in den Knoten ausgegangen wird [9], kann anstelle des statischen Druckes p_2 der jeweilige Senkendruck p_{t2} zur Berechnung herangezogen werden. Die Berechnung eines neuen Betriebspunktes erfolgt mit Hilfe von Gl. 11 und Gl. 12.

$$(11) \frac{(m_{red})_1}{(m_{red})_2} = \frac{\left(f\left(\kappa, R, \frac{p_t}{p}\right)\right)_1}{\left(f\left(\kappa, R, \frac{p_t}{p}\right)\right)_2}$$

$$(12) \dot{m}_2 = \left(\frac{\dot{m} \cdot \sqrt{T_t}}{p_t}\right)_1 \cdot \left(\frac{p_t}{\sqrt{T_t}}\right)_2 \frac{\left(f\left(\kappa, R, \frac{p_t}{p}\right)\right)_2}{\left(f\left(\kappa, R, \frac{p_t}{p}\right)\right)_1}$$

Eine Korrektur des isentrop berechneten Massenstroms kann nach [6] durch Einführung eines Geschwindigkeitskoeffizienten ϕ und eines Temperaturkoeffizienten k_1 stattfinden. In beiden Koeffizienten werden auf polytropen Weg erreichte Werte mit denen des isentropen Vergleichsprozesses in Verhältnis gesetzt (BILD 4).

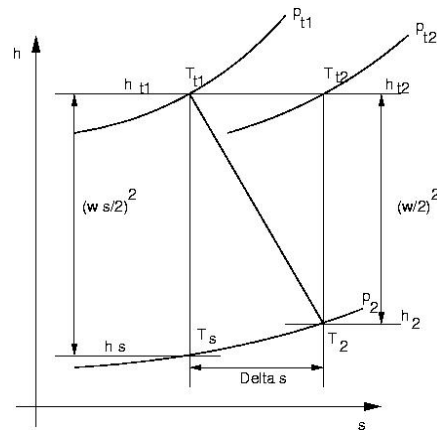


BILD 4. h-s – Diagramm einer isentropen und polytropen Entspannung

Die Definition beider Koeffizienten ist in Gl. 13 und 14 angegeben.

$$(13) \phi = \sqrt{\frac{w^2}{\frac{w_s^2}{2}}} = \sqrt{\frac{c_p \cdot (T_t - T)}{c_p \cdot (T_t - T_s)}}$$

$$(14) k_1 = \frac{T}{T_s}$$

Die Korrektur des isentropen Massenstroms erfolgt nach Gl. 15.

$$(15) \left(\left(\dot{m}_{red}\right)_2\right)_n = \frac{\phi}{k_1} \cdot \left(\left(\dot{m}_{red}\right)_2\right)_s$$

Unter Annahme konstanter Verluste über den gesamten Betriebsbereich kann die Bestimmung des Massenstroms in einem neuen Betriebspunkt mit Hilfe von Gl. 12 erfolgen.

Bei den in einem Triebwerk auftretenden Druck- und Temperaturbereichen ist die Berücksichtigung der Kompressibilität beim Durchsatzverhalten des sekundären Luftsystems unabdingbar.

In dem im Folgenden vorgestellten Luftsystemmodul ist sowohl das inkompressible als auch das kompressible polytrophe Modell implementiert. Dies ermöglicht zum einen Vergleichsstudien der beiden Modellierungen, zum anderen sind aufgrund seiner einfacheren Gleichungsstruktur mit Hilfe des inkompressiblen Modells Aussagen über das numerische Lösungsverhalten des Moduls schneller möglich.

In allen oben genannten Modellen muss der Einfluss rotierender Bauteile auf den Luftmassenstrom berücksichtigt werden. Durch die Rotation von Scheiben und Schaufeln wird ein Druckfeld erzeugt, welches durch das Modell eines erzwungenen Wirbels abgebildet wird. Diesem physikalischen Vorgang kann durch die Verwendung eines äquivalenten Druckes Rechnung getragen werden [2], [10]. Dabei wird die Auswirkung der Rotation auf die Kühlluft äquivalent zu einer Druckerhöhung des Eintrittstotaldruckes p_t bei ruhenden Bauteilen angenommen. Für das äquivalente Druckverhältnis $p_{t,eq.}$ einer Scheiben-Schaufel Konfiguration gilt abhängig von der Winkelgeschwindigkeit der Scheibe ω :

$$(16) \quad p_{t,eq.} = p_t \cdot \left[1 + K_f^2 \cdot \frac{\omega^2}{2 \cdot R \cdot T_t} (r_i^2 - r_a^2) \right] \cdot \left[1 + \frac{\omega^2}{2 \cdot R \cdot T_t} (r_o^2 - r_i^2) \right]$$

4. BERECHNUNGSMETHODE

Unter der Annahme, dass die thermodynamischen Zustände im Gaskanal an den Randknoten und alle den Auslegungspunkt des Luftsystems charakterisierenden Größen in Gl. 8 oder Gl. 12 gegeben sind, kann die Berechnung der Zustände eines neuen Betriebspunktes in zwei Schritten erfolgen.

Im ersten Schritt werden für jede Leitung je nach Modellierung die Terme in Gl. 8 oder Gl. 12, die über den Betriebsbereich konstant bleiben, in dem Leitungswiderstand E zusammengefasst. Bei Verwendung von Gl. 12 werden der Isentropenexponent κ und die spezifische Gaskonstante R entsprechend der Gaszusammensetzung und der aktuellen Quellentotaltemperatur in der jeweiligen Leitung bestimmt ($\kappa = f(T)$).

Im zweiten Berechnungsschritt werden die internen Totaldrücke und -temperaturen sowie die Massenströme in einem neuen Betriebspunkt bestimmt. Dieses Vorgehen wird nachfolgend anhand der kompressiblen Modellierung erläutert. Die Berechnung bei inkompressibler Modellierung erfolgt analog, wobei einige Rechenschritte und Abhängigkeiten entfallen.

Bei gegebenen Randbedingungen, d.h. gegebenen Totaldrücken an Quellen und Senken sowie gegebenen Totaltemperaturen an den Quellen wird in jedem Knoten k des Netzwerkes der Totaldruck geschätzt. Mit diesen Schätzwerten werden die Massendurchsätze der einzelnen Verbindungselemente errechnet und mit der Forderung der Kontinuitätsgleichung (Gl. 17) verglichen.

$$(17) \quad \sum_i \dot{m}_{i(p_{t1}, p_{t2}, T_{t1}, E, \kappa, R)} = \vec{0}$$

Für jedes Untersystem erhält man so ein nichtlineares

Gleichungssystem. Dieses hat die Dimension der Knotenanzahl k des entsprechenden Untersystems und wird mit Hilfe eines *Newton-Raphson* Verfahrens iterativ nach den Kammerdrücken gelöst, wobei die Kammertotaltemperaturen geschätzt und während dieser Iteration als konstante Eingabegröße behandelt werden. Diese Totaltemperaturen werden zur Bestimmung des Isentropenexponenten und der spezifischen Gaskonstante herangezogen. Bei Leitungen mit Rotationseinfluss wird gemäß Gl. 16 ein von der Drehzahl abhängiger äquivalenter Druck bestimmt und zur Berechnung des Massenstroms dieser Leitung herangezogen.

Zur Verbesserung der geschätzten Totaltemperaturen findet im Anschluss eine weitere Iteration statt, in deren Verlauf in jedem der k Knoten des betrachteten Untersystems die Enthalpiebilanzgleichung (Gl. 18) überprüft wird.

$$(18) \quad \sum_i \dot{m}_i h_{(T_i)} = \vec{0}$$

Die Lösung des daraus resultierenden linearen Gleichungssystems führt zu einer verbesserten Approximation der Kammertotaltemperaturen. Mit diesen neuen Kammertotaltemperaturen wird die mit Gl. 17 beschriebene Iteration wiederholt. Dies geschieht so lange, bis sich die damit erzielten Temperaturänderungen unterhalb eines Schwellwertes befinden. Die so erhaltenen Temperaturen, Drücke und Massenströme stellen die Lösung des Systems dar. Der Berechnungsablauf ist BILD (5) dargestellt.

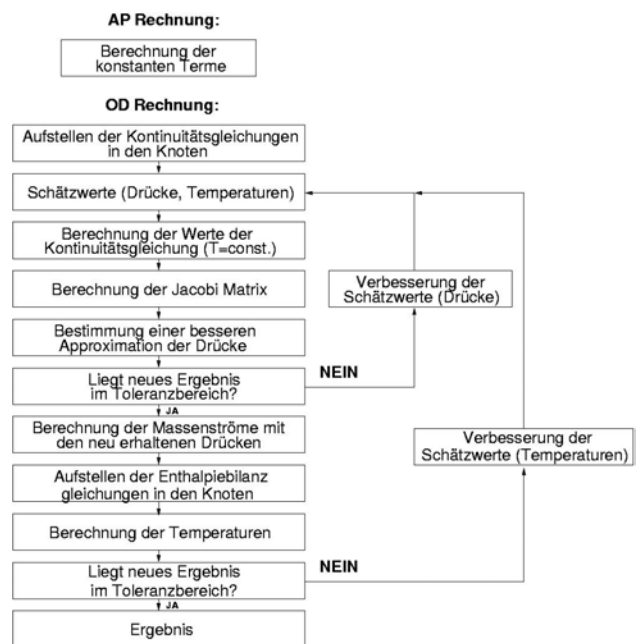


BILD 5. Berechnungsablauf bei kompressibler Modellierung

Da im Gegensatz zu der kompressiblen Modellierung bei der Verwendung der inkompressiblen Modellierung keine Berücksichtigung der Temperatur stattfindet, wird bei Verwendung dieses Modelles für jedes Untersystem lediglich die durch Gl. 17 beschriebene Iteration durchlaufen. Die dafür aufgestellten Massenstrombilan-

zen sind lediglich von dem Strömungswiderstand im Auslegungspunkt E und dem Totaldruckunterschied über die jeweilige Leitung abhängig.

Bei vorhandener Kopplung der einzelnen Untersysteme wird bei beiden oben genannten Modellierungsarten zur Berechnung der Untersysteme ein imaginärer Kopplungsknoten auf halbem Totaldruckgefälle der ursprünglichen Leitung definiert, dessen Zustände (p_t , T_t) für die jeweiligen Untersysteme als konstante Randbedingung während der übrigen Iterationen festgelegt werden. Die Totaltemperatur des imaginären Kopplungsknotens entspricht aufgrund der Temperaturberechnung mit Hilfe von Enthalpiebilanzen der Totaltemperatur der Quelle der entsprechenden Leitung. Sind alle Untersysteme für sich unter diesen Randbedingungen gelöst, findet eine weitere Iteration statt, in der die Totaldrücke der Koppelknoten unter Verwendung der Zustände der an diese Koppelknoten angrenzenden Knoten als Randbedingung gelöst und so eine Gleichheit der in die Kopplungsknoten ein- und austretenden Massenströme erreicht werden.

5. BEISPIELANWENDUNG

In den folgenden Beispielanwendungen werden am Beispiel des Luftsystems eines modernen Zweistromtriebwerkes das numerische Lösungsverhalten und das Betriebsverhalten eines Luftsystems über einen großen Betriebsbereich hinweg gezeigt.

5.1. Test des numerischen Lösungsverhaltens

In BILD (6) ist eine inkompressible Nachrechnung des AP eines Untersystems des in Kap. 3.2 abstrahierten Luftsystems dargestellt. Um das numerische Lösungsverhalten des Systems zu überprüfen, sind die Kammerdrücke stark von ihrem Zielwert ausgelenkt worden (zum Teil über 500 kPa), was in einigen der Leitungen zu einer Rückströmung führt. Trotz dieser extremen Anfangsbedingungen liefert das Rechenverfahren schnell und stabil die Lösung des Systems.

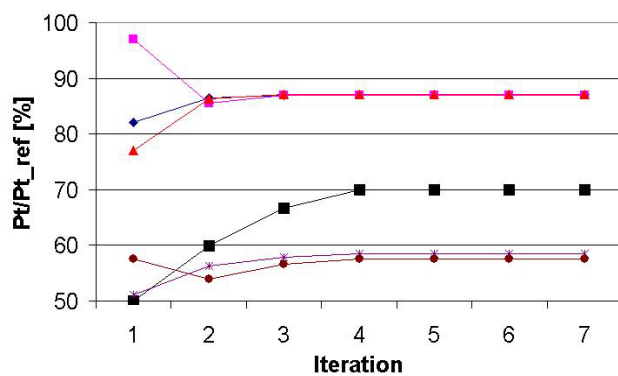


BILD 6. Iterationsverlauf der Kammerdrücke des äußeren Hochdruckluftsystems aus BILD (3)

Das Niederdruckluftsystem des zur quantitativen Validierung herangezogenen Zweistromtriebwerkes wurde zur Berechnung zu einem Untersystem mit 6 internen, drei imaginären Kopplungs- und 5 Randbedingungsknoten abstrahiert. In BILD (7) ist der prozentuale Fehler der Drücke der internen Knoten über der prozentualen Drehzahl bei kompressibler Rechnung aufgetragen.

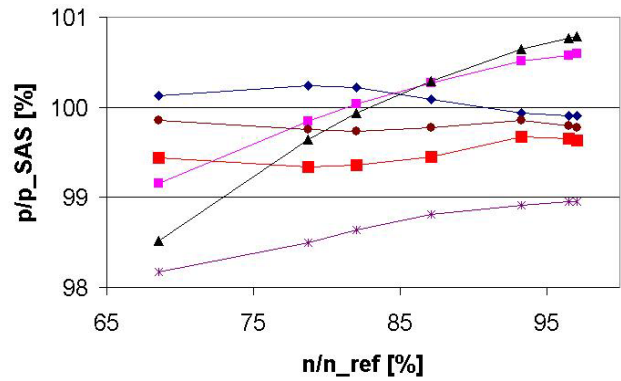


BILD 7. Prozentualer Fehler der Kammerdrücke des Niederdruckluftsystems

Die Verläufe von drei der sechs Kammerdrücke entsprechen ziemlich genau denen der genauen Luftsystemrechnung. Die Abweichungen der anderen drei sind durch die Abstraktion des Systems zu erklären. Dabei ist im gesamten Betriebsbereich die Abweichung kleiner als 2%. Zur Berechnung dieser Drücke waren bei der Auslegungsdrehzahl 11 Iterationsschritte nötig. Die Iterationsschritte erhöht sich bei Variation der Drehzahl bis auf ein Maximum von 34. Dabei wurden die Kammerdrücke immer gleich den Werten im AP gehalten. Bei geeigneter Wahl der Schätzwerte kann eine schnellere Konvergenz erreicht werden. Die Rechnungen zeigen jedoch, dass selbst bei über den Betriebsbereich konstanten Schätzwerten schnelle und robuste Konvergenz erzielt werden kann.

5.2. Beispielberechnung

Um die vorgestellte Berechnungsmethode quantitativ zu validieren, wird diese mit Rechenergebnissen eines eigenständigen Berechnungsverfahrens für Luftsysteme verglichen.

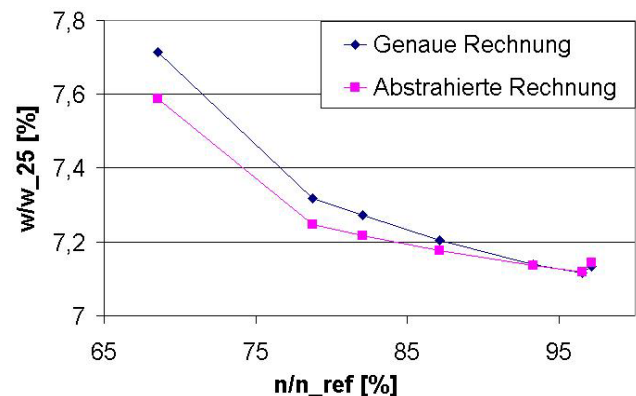


BILD 8. Massenstrom der Abzapfung am äußeren Hochdruckverdichter

In BILD (8) ist der Massendurchsatz des sekundären Luftsystems an mehreren Betriebspunkten des Modelltriebwerkes aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die vereinfachte Modellierung das Betriebsverhalten des Luftsystems gut wiedergibt. Die auf die Abstraktion des Luftsystems zurückzuführende Ungenauigkeit der Rechnung wird zu Gunsten des unproblematischen numerischen Lösungsverhaltens in Kauf genommen. Vor allem in niedrigen Lastbereichen kann im Vergleich zu der

Annahme konstanter Massenstromprozentsätze mit der hier vorgestellten Methode eine bessere Vorhersage der Kühlluftmassenströme erzielt werden.

6. EINBINDUNG IN EIN LEISTUNGSSYNTHESEPROGRAMM

Die Einbindung der oben beschriebenen Luftsystemsimulation in ein Leistungssyntheseprogramm wurde mit Hilfe des Programmes MOPS (*Modular Performance Synthesis*) der Firma MTU Aero Engines demonstriert.

6.1. Notwendige Voraussetzungen

Die Berechnung des Luftsystems wird dabei, angelehnt an den in der Leistungssynthese üblichen modularen Aufbau, als eigenständiges Modul behandelt. Diesem Modul werden die thermodynamischen Randbedingungen an den Randknoten vom eigentlichen Leistungssyntheseprogramm bereitgestellt. Sowohl zur Umrechnungen von Temperaturen in Enthalpien als auch zur Bestimmung des Isentropenexponenten κ und der spezifischen Gaskonstante R greift das Modul auf Unterprogramme des Leistungssyntheseprogrammes zurück. Das Lösen der nichtlinearen Gleichungssysteme findet mit Hilfe des im Leistungssyntheseprogramm implementierten Löser [5] statt. Erst wenn das Luftsystem komplett gelöst ist, werden die ermittelten Daten dem Leistungssyntheseprogramm übergeben.

Die Topologie des abstrahierten Luftsystems wird dem Modul mittels einer Eingabedatei zur Verfügung gestellt. In dieser sind auch Angaben über die thermo-dynamischen Zustände des abstrahierten Luftsystems im AP, den Einfluss der Rotation auf die Strömung und eine Auswahlmöglichkeit zur Festlegung der gewünschten Berechnungsweise (inkompressibel oder kompressibel) enthalten.

6.2. Berechnung eines Arbeitspunktes

Ein gegebener Arbeitspunkt wird zunächst mit gegebenen Kühlluftprozentsätzen errechnet. Im Anschluss werden in diesem neuen Betriebspunkt bei den durch die Syntheserechnung ermittelten, konstant gehaltenen Randbedingungen neue Zustände des Luftsystems generiert. Die sich dabei ergebenden Abzapf- und Zuzugsströme können, wie in Abschnitt 5 gezeigt, stark von denen abweichen, die durch die Annahme konstanter Massenstromprozentsätze entstehen. Daher erfolgt erneut eine Syntheserechnung, bei der diesmal die errechneten Sekundärluft-Massenströme benutzt werden. Da sich nun neue Randbedingungen ergeben, ist dieses Verfahren iterativ fortzusetzen.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Um das sekundäre Luftsystem in der Leistungssyntheserechnung seiner Bedeutung entsprechend berücksichtigen zu können, ist eine Methode zur allgemein gültigen Abstraktion detaillierter Luftsysteme vorgeführt worden. Als zutreffendste physikalische Beschreibung des Problems ist die polytrope Ausflussfunktion identifiziert worden. Der Vergleich von Beispielrechnungen mit dieser Modellierung und Ergebnissen aus einem eigenständigen Berechnungsverfahren für Luftsysteme ergaben eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Ergebnisse. Die darin aufgrund der Abstraktion des Luftsystems auftretende Ungenauigkeit wird akzeptiert, da mit diesem System eine in die Leistungsrechnung integrierte und numerisch robuste Rechnung erfolgen kann.

Nach der Vorstellung und Validierung der Modellierung wurde die Kopplung von Luftsystem- und Leistungssyntheserechnung vorgestellt. Dabei werden iterativ die Kühlluftmassenströme der beiden Systeme abgeglichen. Das hier vorgestellte Modell stellt die Grundlage einer exakteren Vorhersage und Einbeziehung der Kühlluftmassenströme in der Leistungssyntheserechnung in verschiedenen Betriebspunkten dar. In den internen Knoten ist eine Vorhersage von Druck und Temperatur möglich. Daher kann ein realistischer Wert der Temperatur der Kühlluft bei ihrer Zumischung in die Turbine verwendet werden. Der Druck in bestimmten internen Knoten ermöglicht eine Aussage über den Axialschubausgleich des Triebwerkes. Dies ist besonders im Bereich niedriger Drehzahlen von Interesse.

Die vorgestellte Methode bildet zudem eine gute Grundlage für eine bessere Berücksichtigung von Wärmeübertragungsvorgängen und die Möglichkeit von Spaltänderungsvorhersagen bei der Leistungssimulation von Gasturbinen über einen weiten Betriebsbereich. Durch exakte Vorhersagen ist es möglich, Kosten und Risiken in der Entwicklung zu senken.

8. DANKSAGUNG

Die in dieser Veröffentlichung vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen einer Kooperation zwischen der MTU Aero Engine GmbH und dem Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart. Die Autoren wollen hiermit allen Beteiligten, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, und der MTU Aero Engine GmbH für die Erlaubnis zur Veröffentlichung danken.

9. LITERATUR

- [1] R. Fiola. „Berechnung des Instationären Betriebsverhaltens von Gasturbinen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundäreffekten“. Dissertation TU München, 1993.
- [2] H. F. Jen, J. B. Sobanik. „Cooling Air Flow Characteristics in Gas Turbine Components“. ASME Paper 81-GT-76, 1981.
- [3] K. J. Kutz, T. M. Speer. „Simulation of the Secondary Air System of Aero Engines“. Transaction of the ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 116, Pp. 306 – 315, 1994.
- [4] B. E. Larock, R. W. Jeppson, G. Z. Watters. „Hydraulics of Pipeline Systems“. CRC Press, 2000.
- [5] J. J. Moore, B. S. Garbow, K. E. Hillstrom. „User Guide for MINPACK - 1“. Argonne National Laboratory, 1980.
- [6] H. G. Münzberg. „Flugantriebe“. Springer Verlag, 1972.
- [7] H. G. Münzberg. „Einsatz von Modellstudien bei der Entwicklung von Turbostrahltriebwerken“. ZFW, Heft 4, 1979.
- [8] L. M. Rodríguez. „An Improved Method for Accounting of Bleed Air on Gas Turbine Off-Design Performance“. ISABE Paper No.: 99-7263, 1999.
- [9] J. R. Rose. „FLOWNET: A Computer Program for Calculating Secondary Flow Calculations in a Network of Turbomachinery“. NASA TM X-73774, 1978.
- [10] S. Staudacher. „Untersuchung zum Sekundären Luftsystem von Luftstrahltriebwerken“. Dissertation TU München, 1995.