

VERFAHREN ZUR ZUSTANDSANALYSE VON ENTWICKLUNGS- UND SERIENTRIEBWERKEN AM BEISPIEL EINES WELLENLEISTUNGSTRIEBWERKS

H. Abdullahi, A. Utler
MTU Aero Engines
Postfach 50 06 40, 80976 München

ÜBERSICHT

Störungen im Triebwerksbetriebsverhalten werden durch Veränderungen der Triebwerkskomponenten hervorgerufen. Das Thema dieser Arbeit ist die Erfassung der Komponentenänderungen durch Zustandsgrößen, die aus Messgrößen ermittelt werden, die drei gebräuchlichsten Verfahren zur Analyse des Triebwerksbetriebsverhaltens sowie die Interpretation der Rechenergebnisse. Hierbei wird auf Messprobleme und deren Behandlung, die Vor- und Nachteile der Analyseverfahren im Vergleich eingegangen und darauf, wie man zu einer richtigen Interpretation gelangen kann.

BEZEICHNUNGEN

A_{405}	engster HDT-Querschnitt
HDT	Hochdruckturbine
h_u	unterer Heizwert
h_3	Enthalpie am Verdichteraustritt
h_{41}	Enthalpie am HDT-Rotoreintritt
N_G	Gasgeneratordrehzahl
N_{NT}	Nutzturbinendrehzahl
NT	Nutzturbine
P_{405}	Druck im engsten HDT-Querschnitt
R	allgemeine Gaskonstante
rel	relativ zu einem Referenzwert
TRQ	Abtriebsdrehmoment
T_{405}	Temperatur im engsten HDT-Querschnitt
W_1	Luftdurchsatz am Triebwerkseintritt
W_{405}	Gasdurchsatz im engsten HDT-Querschnitt
κ	isentropen Exponent
η_B	Ausbrenngrad
Δ	Delta
0	Index für Referenzzustand

1. EINLEITUNG

Das Thema Triebwerksanalyse bleibt immer aktuell, weil aus wirtschaftlichen Gründen Triebwerke im Serienbetrieb nur noch bei Bedarf gewartet und die Entwicklungsphasen von Triebwerken immer kürzer werden sollen. Durch richtige Analysen werden Fehler schneller lokalisiert und Maßnahmen schneller daraufhin überprüft ob diese zur Erreichung der Ziele geeignet sind.

In dieser Arbeit soll eine Übersicht über die gebräuchlichsten Verfahren und Schritte der Analyse am Beispiel eines Wellenleistungstriebwerks gegeben werden. Zunächst werden allgemein Störungen des Triebwerksbe-

triebsverhaltens, hervorgerufen durch Veränderungen der Triebwerkskomponenten und die Zustandsgrößen zu deren Erfassung beschrieben. Ein Problem liegt darin, dass die zur Berechnung der Zustandsgrößen notwendigen Messgrößen nicht alle verfügbar sind und die Werte der verfügbaren Messgrößen mit Fehlern behaftet sein können. Somit wird auf die Messprobleme und deren Behandlung eingegangen. Weiterhin werden die gebräuchlichsten Analyseverfahren, die inverse Kreisprozessrechnung, die Analyse auf Basis von Synthesemodellen und die Analyse auf der Basis von linearen Modellen beschrieben. Bei der Analyse ist über die Berechnung der Zustandsgrößen hinaus, eine Interpretation der Rechenergebnisse erforderlich. Es wird aufgezeigt, was zu beachten ist um zu einer richtigen Interpretation zu gelangen. Abschließend wird ein Analysebeispiel besprochen.

2. TRIEBWERKSSTÖRUNGEN UND ERFASSUNG

Änderungen von Komponenten eines Triebwerks, wie in BILD 1, können gezielt oder unbeabsichtigt sein. Letztere werden durch Konstruktions-, Fertigungs- und Montageabweichungen, Verschleiß und Schmutzablagerungen verursacht. Alle Änderungen haben jedoch eine Störung des Triebwerksbetriebsverhaltens zur Folge.

Während der Entwicklungsphase eines Triebwerks steht u. a. das Ziel einer optimalen Abstimmung der Triebwerkskomponenten aufeinander im Vordergrund. In der Regel wird dies durch Vergrößerung oder Verkleinerung der Turbinenkapazität erreicht. BILD 2 zeigt beispielhaft die Änderungen der Kennfeldparameter einer zurückgeschnittenen Nutzturbine. Hier wurde die Kapazität W_r ohne Einbuße an Wirkungsgrad η um 4% vergrößert. Dies hat bei diesem Beispiel zur Folge, dass sich die Betriebslinie im Verdichterkennfeld absenkt und zugleich der Wirkungsgrad des Verdichters sich zur Teillast hin verbessert. Eine ähnliche Auswirkung hat eine Kapazitätsänderung der Hochdruckturbinen. Eine Betriebslinienverlagerung des Verdichters kann auch durch eine Änderung des Wirkungsgradniveaus des Verdichters selbst und der Hochdruckturbinen oder durch eine Änderung der Sekundärluftmenge bewirkt werden.

Eine Ursache für Verschleiß während des Betriebs eines Triebwerks ist der Einschlag von Fremdkörpern, z.B. von Sand, der vor allem die Schaufelvorderkanten des Verdichters beschädigt. BILD 3 zeigt die Auswirkungen von Sand auf den Verdichter, der zu einer Verringerung der Kapazität und Verschlechterung des Wirkungsgrades führt. Sand im Triebwerk kann auch zur Verstopfung der Kühlluftbohrungen im Turbinenbereich führen.

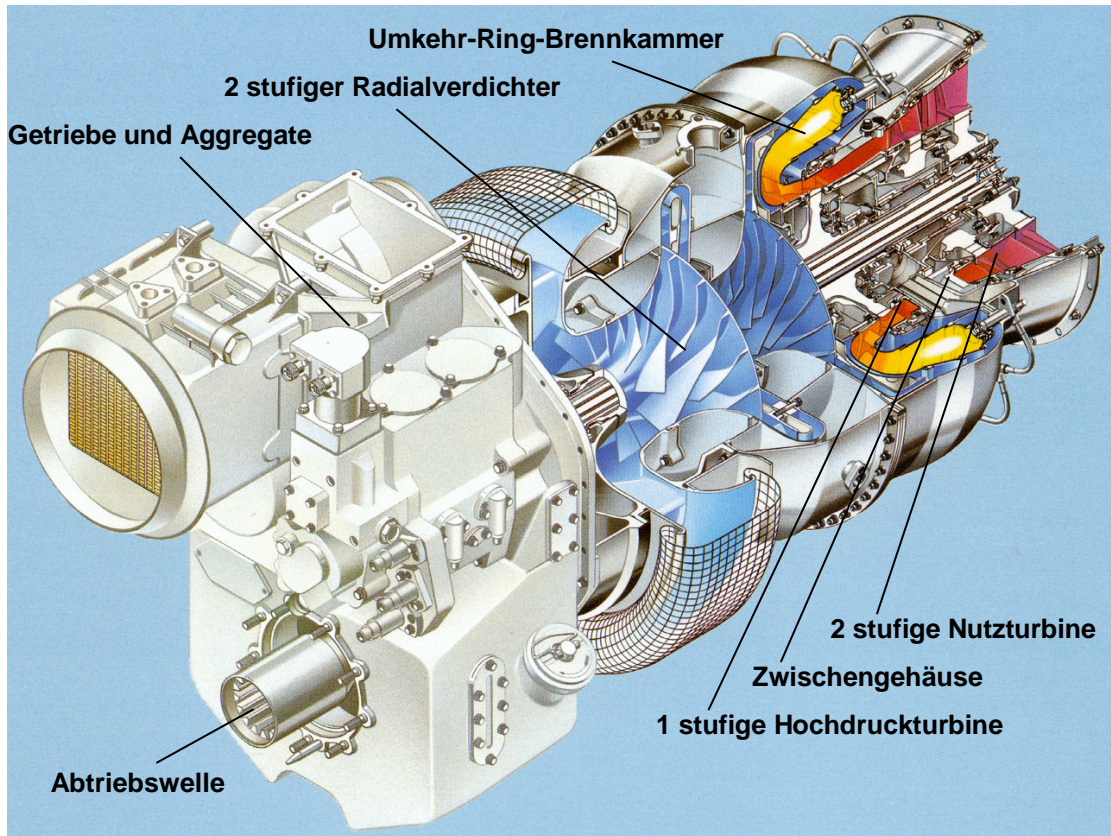


BILD 1: Das Triebwerk MTR390

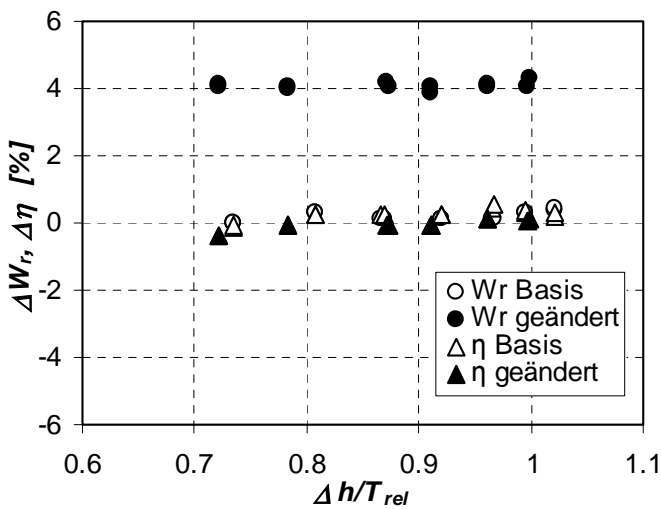


BILD 2: Änderung der Nutzturbinencharakteristiken durch Zurückschneiden des Leitkranzes, Kapazität W_r und Wirkungsgrad η über der reduzierten spezifischen Leistung $\Delta h/T_{rel}$

Die Veränderungen der Komponenten und damit die Störungen im Betriebsverhalten eines Triebwerks lassen sich bei der thermodynamischen Kreisprozessanalyse durch Abweichungen der folgenden mittelbaren Größen, hier Zustandsgrößen oder Charakteristiken der Komponenten genannt und mit Vektor x bezeichnet, von ihrem jeweiligen Referenzwert erfassen:

- beim Verdichter und der Turbine durch die Kapazität W_r und den isentropen Wirkungsgrad η
- bei der Brennkammer durch den Druckverlust $\Delta\pi$ und Ausbrenngrad η
- bei Kanälen und Diffusoren durch den Druckverlust $\Delta\pi$
- beim Luftsystem, z.B. erhöhte Leckage, durch den Sekundärluftdurchsatz W_S
- bei mechanischen Systemen, z.B. erhöhte Reibungsverluste in den Lagern und im Getriebe, durch den mechanischen Wirkungsgrad η .

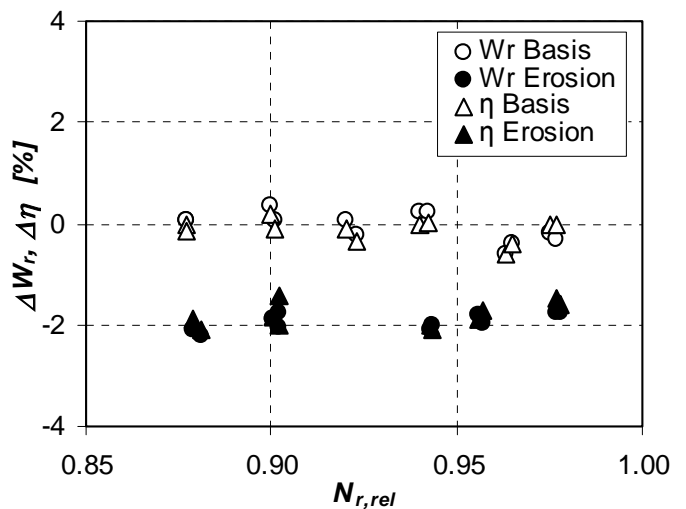


BILD 3: Änderung der Verdichtercharakteristiken durch Erosion bei Sandeinwirkung, Kapazität W_r und Wirkungsgrad η über der reduzierten Drehzahl $N_{r,rel}$

3. MESSPROBLEME UND BEHANDLUNG

Die Zustandsgrößen werden aus unmittelbar gemessenen Größen bestimmt. Diese Messgrößen, mit Vektor y bezeichnet, sind die Strömungsparameter Temperaturen T , Gesamtdrücke P sowie statische Drücke S der Triebwerksebenen, sowie die globalen Parameter, wie Kraftstoffdurchsatz W_F , Drehzahlen N und Drehmomente TRQ .

Bei den Messungen sind Probleme vielfältiger Art zu lösen. So sind z.B. erforderliche Messgrößen nicht verfügbar, weil bestimmte Triebwerksebenen aus Platzgründen nicht zugänglich sind und Temperaturen, z.B. am HDT-Eintritt, so hoch sind, dass die Messsonden schmelzen. Die Zulaufstrecke zum Messinstrument kann zu kurz sein, so dass z.B. durch Nachlaufdübeln der repräsentative Mittelwert der Strömung nicht erfasst wird. BILD 4a und 4b zeigen ein typisches Druckprofil unmittelbar nach der Hochdruckturbinen.

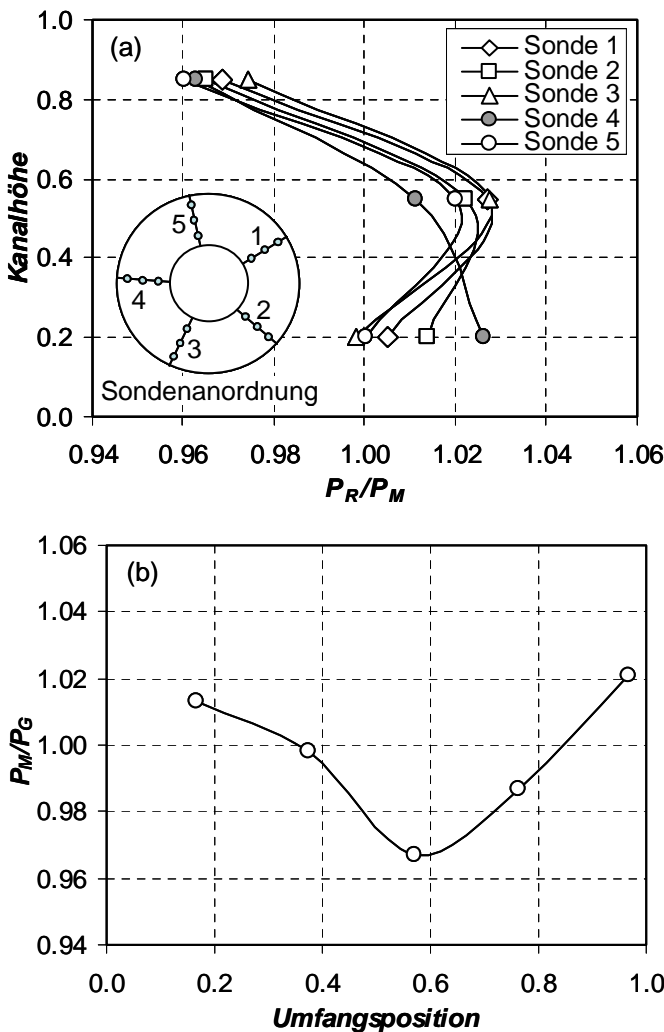


BILD 4: Typisches Druckprofil in a) radialer P_R und b) Umfangsrichtung P_M (Mittelwert einer Sonde) am Austritt einer Hochdruckturbinen, P_G ist der Gesamtmittelwert

Messinstrumente in einem Querschnitt verfälschen die Strömungsparameter. Dieser Effekt verstärkt sich besonders bei kleinen Triebwerken, wenn mehrere Messsonden an

einer Stelle angebracht werden um die Repräsentativität des Messwertes zu erhöhen. Wenn das Profil des Strömungsparameters stark ausgeprägt und lastabhängig ist, reicht die höchstmögliche Anzahl von Sonden nicht aus, um eine genügend genaue Repräsentativität und Wiederholbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Weiterhin können die Messwerte selbst mit systematischen und zufälligen Fehlern behaftet sein, wie das BILD 5 verdeutlicht.

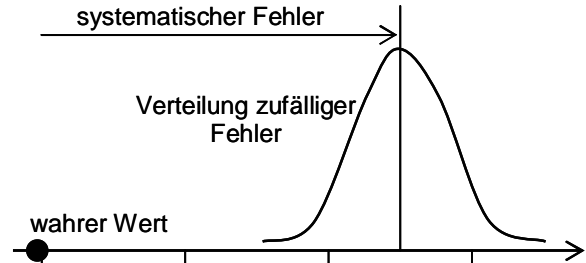


BILD 5: Zufällige und systematische Messfehler

3.1 Plausibilitätskontrolle

Ein erster Schritt der Überprüfung von Messwerten ist die Plausibilitätskontrolle. A priori wird ein Bereich festgelegt, in dem sich die Werte einer Messgröße bewegen dürfen. Damit kann erkannt werden, ob z.B. ein erwartetes Profil, ein Sondenausfall oder ein Ausreißer vorliegt.

3.2 Behandlung fehlender Messwerte und systematischer Fehler

Durch Anwendung bestimmter physikalischer Beziehungen z.B. aus dem Energie- und Massenerhaltungssatz wird der Wert eines Strömungsparameters ermittelt, der dann als Ersatz für einen nicht verfügbaren Messwert oder als Kontrollwert für einen gemessenen Wert herangezogen wird. Ein typisches Problem bei einem Zweiwellen-Zweistrom-Triebwerk besteht darin, dass der Luftdurchsatz am Eintritt des Kerntriebwerks und die HDT-Eintrittstemperatur nicht unmittelbar gemessen werden können. Diese können jedoch durch die so genannte Kapazitätsmethode berechnet werden. Sie beruht auf der Energiebilanz zwischen Austritt des Verdichters und Eintritt des HDT-Rotors

$$\Delta h_{41} - \Delta h_3 + \frac{W_F}{W_3} \cdot (\Delta h_{41} - \Delta h_F) = \frac{W_F}{W_3} \cdot \eta_B \cdot h_u \quad (1)$$

und auf der Tatsache, dass der HDT-Leitkranz im engsten Querschnitt kritisch durchströmt wird

$$\frac{W_{405} \cdot \sqrt{T_{405}}}{A_{405} \cdot P_{405}} = \sqrt{\frac{\kappa}{R} \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (2)$$

Der Durchsatz und die Temperatur lassen sich iterativ bestimmen, vgl. [1]. Auch andere Größen des Triebwerks können auf ähnliche Weise berechnet werden.

Systematische Fehler haben ihre Ursachen hauptsächlich in der Messkette an sich, z.B. fehlerhafte Eichung und fehlerhafter Einbau der Messsonden. Durch die Berechnung redundanter Werte mit Hilfe von bekannten physikalischen Zusammenhängen können systematische Fehler erkannt werden.

3.3 Behandlung zufälliger Fehler

Erfahrungsgemäß treten zufällige Fehler bei jeder Messung einer physikalischen Größe auf. Diese können durch filtern eliminiert werden, wenn eine hinreichend große Anzahl von Messwerten für eine Größe vorliegt. Die einfachste Möglichkeit, zu filtern, ist die Anwendung eines Mittelwertbildners. Aus den Mittelwerten der Messungen lassen sich dann mit Hilfe eines Synthesemodells die entsprechend genauen Werte der Zustandsgröße bestimmen. Sind die Eigenschaften der zufälligen Fehler bekannt, können besonders bei linearen Modellen effizientere Filter, wie z.B. der Weighed-Least-Square- und Kalman-Filter [2,3], verwendet werden.

4. ANALYSEVERFAHREN

4.1 Inverse Arbeitsprozessrechnung

Bei Arbeitsprozessrechnungen sind die Charakteristiken der Komponenten bekannt und daraus werden die Strömungs- und globalen Triebwerksparameter also Messgrößen bestimmt. Bei der inversen Arbeitsprozessrechnung dagegen werden die Zustandsgrößen der Triebwerkskomponenten aus den Messgrößen ermittelt, so z.B. der Verdichterwirkungsgrad aus den Drücken und Temperaturen am Eintritt und Austritt des Verdichters. Dieser Zustand des Triebwerks wird mit einem Referenzzustand verglichen.

Wegen des relativ einfachen Rechenweges, es treten keine Probleme wie Rechenabbruch durch Konvergenzprobleme auf, wird dieses Verfahren in der Industrie häufig als *Schnell-Analyse*-Verfahren an Prüfständen eingesetzt. Da bei der inversen Arbeitsprozessrechnung die Zustandsgrößen der einzelnen Komponenten losgelöst von anderen Komponenten und nur entlang der Betriebslinie betrachtet werden, ist sie fehleranfällig.

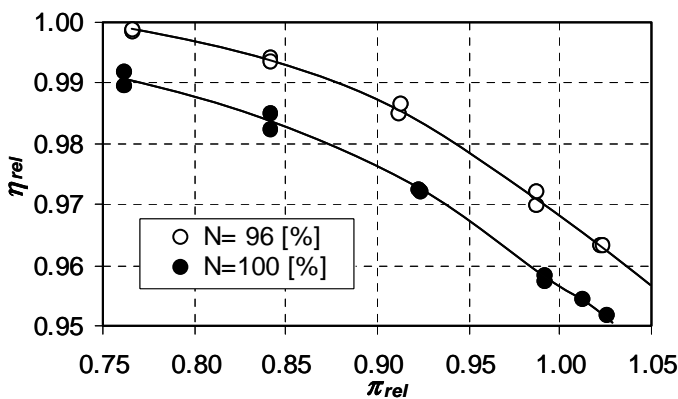


BILD 6: Nutzturbinenwirkungsgrad über -druckverhältnis, Analyse ohne Berücksichtigung von Kennfeldern

Das Ergebnis eines Triebwerksversuchs, bei dem die NT-Drehzahl um 4% erhöht wurde, was einen Verlust der Triebwerksleistung zur Folge hatte, ist in BILD 6 dargestellt. Laut *Schnellanalyse* tritt eine Verschlechterung des Nutzturbinenwirkungsgrades von etwa 1% ein. Bei näherer Betrachtung hat sich der Zustand der Nutzturbine jedoch nicht

verändert. Die Betriebslinie *BL* liegt nur in einem Kennfeldbereich, in dem der Wirkungsgrad niedriger verläuft. BILD 7 verdeutlicht die Folge einer Änderung der absoluten Drehzahl *N* im Kennfeld. Bei modellbasierenden Analysen erfolgt die Berücksichtigung von Kennfeldern automatisch.

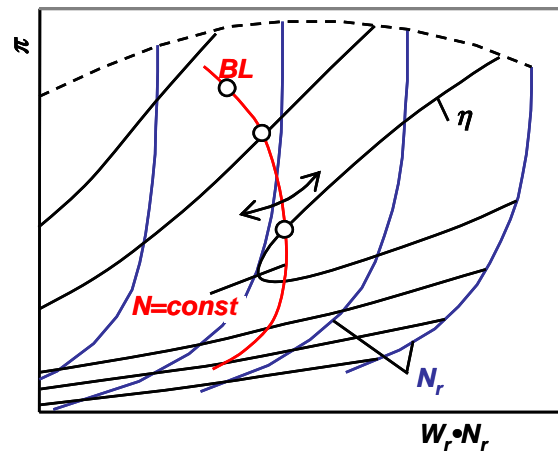


BILD 7: Bei Verschiebung der Betriebslinie im Nutzturbinenkennfeld durch Änderung der absoluten Drehzahl *N* ändert sich der Wirkungsgrad entlang der Betriebslinie

4.2 Analyse auf der Basis von Synthesemodellen

Das Synthesemodell beschreibt das Betriebsverhalten des Triebwerks und das seiner Komponenten. Es basiert auf den Charakteristiken der Komponenten, deren Zusammenspiel durch die Erhaltungssätze der Physik und der thermischen und kalorischen Beziehungen des Arbeitsmediums bestimmt wird. Für ein stationäres Modell lassen sich diese Beziehungen durch ein nicht lineares Gleichungssystem mit *x* als den bekannten Komponentencharakteristiken, Kontrollparametern sowie Umgebungsbedingungen und *y* als den abhängigen Strömungs- und globalen Parametern, darstellen, vgl. [4]. Wegen der Nichtlinearität kann das Gleichungssystem nur iterativ gelöst werden. BILD 8 zeigt schematisch die Arbeitsweise des Synthesemodells eines Wellenleistungstriebwerks.

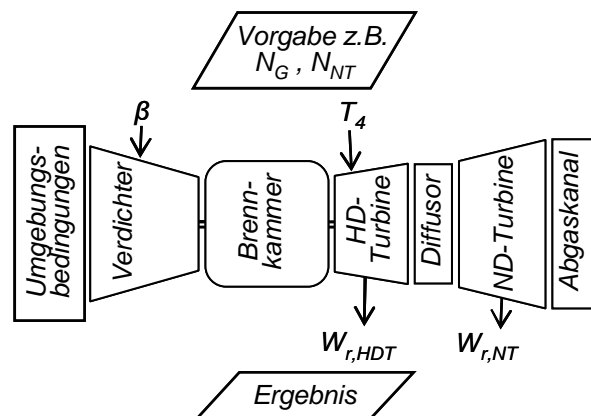


BILD 8: Schema für ein Synthesemodell eines Wellenleistungstriebwerks mit den äußeren Iterationsvariablen β und T_4 sowie Fehlergrößen $W_{r,HDT}$ und $W_{r,NT}$

Der Betriebspunkt bei einer bestimmten Umgebungsbedingung ist durch die Vorgabe zweier Größen, z.B. Gaskompressor- N_G und Nutzturbinendrehzahl N_{NT} bestimmt. Für den Rechenablauf sind Iterationsvariablen und Iterationsfehler erforderlich. Als Ergebnis erhält man die Strömungs- und globalen Parameter. Dies ist der normale Weg für eine Kreisprozessrechnung. Bei der Analyse hingegen wird auf die Strömungs- und globalen Parameter, die als Messwerte vorliegen, hin iteriert. Iterationsvariablen sind in diesem Fall die Charakteristiken der Komponenten x . Die resultierenden Abweichungen der Zustandsgrößen gegenüber dem Anfangszustand des Modells sind ein Maß für die Änderungen der Komponenten.

Die Analyse ist für den Verdichter als Beispiel für alle Triebwerkskomponenten in BILD 9 schematisch dargestellt. Aus der Messung werden die reduzierte Drehzahl N_r und eine Hilfskoordinate β gewonnen und dazu verwendet, den reduzierten Durchsatz $W_{r,K}$ und Wirkungsgrad η_K aus dem Verdichterkennfeld abzulesen. Aus derselben Messung sind die Größen Temperatur T_E und Druck P_E am Verdichtereintritt und die Drehzahl N bekannt. Aus ihnen werden näherungsweise die Effekte (f_w, f_η), wie Reynoldszahl- Re , Stoffwert- γ und Spaltänderung s auf die Kennfeldwerte berechnet. Damit ergeben sich die Werte des Referenzzustandes $W_{r,0}$ und η_0 . Aus den Messwerten werden weiterhin die Istwerte des Kennfelds $W_{r,M}$ und η_M berechnet. Die Differenz zwischen Ist- und Referenzwert ist die tatsächliche Änderung der Zustandsgrößen, vgl. [5].

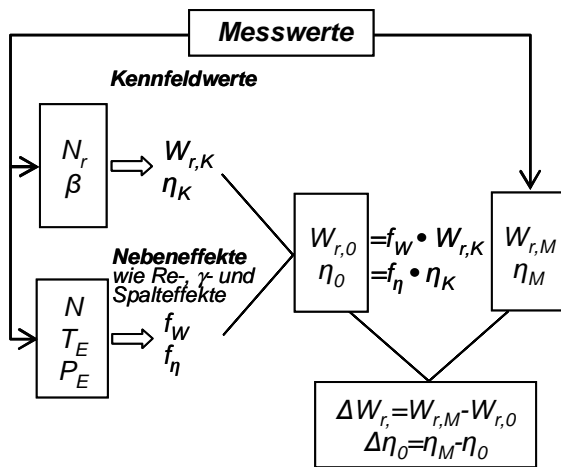


BILD 9: Berücksichtigung von Kennfeldwerten ($W_{r,K}, \eta_K$) und Korrekturen für Nebeneffekte (f_w, f_η) als Referenzzustand ($W_{r,0}, \eta_0$) am Beispiel eines Verdichterkennfelds

4.3 Analyse auf der Basis von linearen Modellen

Es gibt zahlreiche Untersuchungen zur Anwendung systemtheoretischer Ansätze in der Triebwerksanalyse, wie [6,7]. Diese zeigen, dass durch Einsatz dieser Ansätze Messfehler durch das Superpositionsprinzip berücksichtigt und besonders effiziente Filteralgorithmen angewendet werden können. Hierzu ist es notwendig, dass das Triebwerksbetriebsverhalten, d.h. der Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen und Messgrößen, in der Umgebung eines Betriebspunktes linearisiert wird und die Änderungen ge-

genüber einem Referenzzustand in diesem Punkt betrachtet werden. Damit gilt:

$$\Delta y = E \cdot \Delta x \quad (3)$$

Wobei E die Einflussmatrix mit den Koeffizienten $e_{i,j} = x_{i,0} / y_{j,0} (\partial f_j / \partial x_i)$ darstellt, und die Änderungen von Δx und Δy relativ sind. Sie kann direkt aus der Definition der Zustandsgrößen durch Bildung der totalen Differentiale bestimmt werden, siehe z.B. [6] oder aus Effektenrechnungen mit dem Synthesemodell. Bei einer bestimmten Triebwerkslast sind so viele Rechnungen mit dem Synthesemodell durchzuführen, wie die Anzahl der Zustandsgrößen beträgt. Dabei wird jeweils nur eine Zustandsgröße um 1% verändert. Mit den sich ergebenden Änderungen der Messgrößen lassen sich dann die Koeffizienten der Einflussmatrix bilden. Wegen der Linearität sollte für jede Triebwerkslast eine entsprechende Einflussmatrix bereit stehen.

Bei der Lösung der Gleichung (3) nach Δx können entsprechend der zur Verfügung stehenden Anzahl von Messgrößen und deren Wiederholungen bei der Messung verschiedene Fälle auftreten. Der Fall mit der wahrscheinlichsten Lösung ergibt sich, wenn mehr Messwerte als entsprechende Zustandsgrößen zur Verfügung stehen und die Fehler der Messwerte normal verteilt sind. Man erhält dann die Lösung mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Durch die Einführung der transponierten Matrix E^T zur Einflussmatrix und den Gewichtungen G zur Berücksichtigung unterschiedlicher Genauigkeiten der Messungen erhält man das Analysemodell zur Bestimmung der Zustandsgrößen, auch Weighed-Least-Square-Schätzer genannt.

$$\Delta x = (G^T \cdot E^T \cdot G \cdot E)^{-1} \cdot G^T \cdot E^T \cdot G \cdot \Delta y \quad (4)$$

5. INTERPRETATION DER ERGEBNISSE

Beide modellbasierten Analyseverfahren führen zu denselben Ergebnissen, wichtig ist die daran anschließende Interpretation um deren Richtigkeit zu überprüfen. Dazu ist die Berücksichtigung zusätzlicher Information, z.B. über den Lebenslauf des Serientriebwerks oder Art und Zweck der Modifikationen bei Entwicklungstriebwerken, den Zustand der Messinstrumentierung und die Ablaufbedingungen der Probeläufe notwendig. Es ist nochmals zu überprüfen, ob die Modifikationen hinsichtlich der Ziele geeignet sind und ob die Modifikationsempfehlungen vollständig durchgeführt wurden. TAB. 1 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt eines Montageprotokolls eines Triebwerksaufbaus für den HDT-Bereich.

Im Triebwerk werden normalerweise außer den Parametern, die in der Zustandsanalyse verwendet werden, zusätzliche Größen gemessen, siehe das Beispiel einer Hochdruckturbinen in BILD 10. Aus den statischen Drücken und mit dem HDT-Eintrittstotaldruck kann der Reaktionsgrad r gebildet werden.

$$r = \left\{ \left(\frac{S_{41}}{P_4} \right)^{\frac{R}{cp}} - \left(\frac{S_{44}}{P_4} \right)^{\frac{R}{cp}} \right\} / \left\{ 1 - \left(\frac{S_{44}}{P_4} \right)^{\frac{R}{cp}} \right\} \quad (5)$$

Aus den Materialtemperaturen des Turbinenliners und des Turbinentrings, der Kühlluft- sowie der HDT-Eintritts-

temperatur lassen sich die entsprechenden Kühleffektivitäten gewinnen. Daraus und aus dem Montagespalt sowie aus der Rotordrehzahl wird der Betriebsspalt bestimmt.

Modifikationen	Triebwerksaufbau	
	1	2
Dichtring		
- Abdichtung	verbessert	verbessert
- Aufnahme	ungeschlossen	geschlossen
- Ausführung	unverstärkt	unverstärkt
- Standard	2A	2A+
Heißgasabschirmung	nicht vorhanden	nicht vorhanden
Hitzschildlänge mm	0.3	0.4
Leitradklasse	nominal	nominal
Leitschaufeln		
- Dichtleistenbreite mm	3.8	2.83
- Filmkühlung	vorhanden	vorhanden
- Hinterkantenkühlung	nicht vorhanden	nicht vorhanden
- Standard	2A+	2A+
- Stoßabdichtung	verbessert	verbessert
- Stoßspalt	reduziert	reduziert
Liner		
- Bohrungen vorne	nicht vorhanden	nicht vorhanden
- exzentrisch geschliffen	nein	nein
- Spoiler hinten	nicht vorhanden	vorhanden
- Spoiler vorne	nicht vorhanden	nicht vorhanden
- Stoßspalt mm	1.15	0.85
Montagespaltänderung %	3.2	3.6
Tragring		
- Kühlluftbohrungen	nicht vorhanden	vorhanden
- Material	C263	C263
- Wärmedämmschicht	vorhanden	vorhanden

TAB. 1: Ausschnitt eines Montageprotokolls

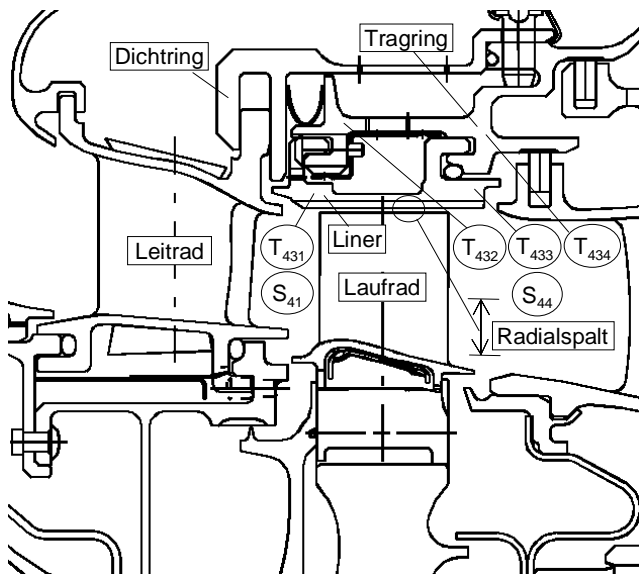


BILD 10: Schnittbild der Hochdruckturbinen mit zusätzlichen Messgrößen für die Analyse

Diese abgeleiteten Größen können zur Beurteilung der Turbinen herangezogen werden. Voraussetzung sind die

Kenntnisse von den Zusammenhängen zwischen den zusätzlichen- und den Zustandsgrößen, die aus der Auslegung und aus der Erfahrung während der Entwicklung gewonnen werden. TAB. 2 zeigt beispielhaft einige Einflussgrößen und ihre Beziehungen zum Reaktionsgrad und Wirkungsgrad der Turbine.

Einflußgrößen	Änderung	Symptom r	Folge η_{HDT}
Betriebsspalt	↑	↓	↓
Leckage	↑	↑	↓
Filmkühlung	↑	↑	↓
Flächenverhältnis	↑	↑	↓
NT-Kapazität	↑	↑	→

TAB. 2: Beispiel für Zusammenhänge zwischen hochdruckturbinenrelevanten Größen, die Symbole bedeuten ↑ Anstieg, → unverändert, ↓ Abfall

6. ANALYSEBEISPIEL

An einem Triebwerksaufbau wurden gegenüber einem Referenzaufbau Modifikationen an der Hochdruckturbinen vorgenommen, um die Leckage zwischen Leit- und Laufrad zu reduzieren sowie zugleich das Anlaufen des Laufrads zu vermeiden. Eine neue modifizierte Nutzturbine wurde eingebaut, um ihren Radialspalt im Betrieb zu verkleinern. Außerdem wurde ein neuer Verdichter vom selben Standard verwendet, der jedoch aufgrund von Produktionsstreuungen Abweichungen aufweisen kann.

Messgrößen	Änderungen %
T_0	7.12
T_1	7.12
T_3	5.81
T_5	5.56
P_0	-0.80
P_1	-0.79
P_3	-2.91
S_{31}	-1.58
P_{44}	-0.96
P_5	-0.95
N_G	2.74
N_{NT}	3.63
TRQ	-2.06
W_1	-5.34
W_F	0.78

TAB. 3: Messgrößen mit Redundanz in den Drücken am Verdichteraustritt P_3 und S_{31} sowie Messwertdifferenzen zwischen den Triebwerksaufbauten

Die Aufgabe der Zustandsanalyse ist es, die Auswirkungen dieser Modifikationen im Vergleich zum Referenzzustand festzustellen. Im vorliegenden Fall ist die Analyse besonders schwierig, weil gleichzeitige Änderungen an mehreren Komponenten eine eindeutige Ursache-Wirkung-Zuordnung erschweren. Zudem braucht ein neuer Triebwerksaufbau eine neue Instrumentierung, die eine Quelle für systematische Fehler sein kann. TAB. 3 zeigt die für die Analyse zur Verfügung stehenden Messwerte. Zwei Versionen von Rechnungen wurden durchgeführt.

Das Ergebnis ist in BILD 11 dargestellt. Aufgrund der begrenzten Anzahl der Messgrößen und Ihrer Messwerte sind nur die Änderungen der Zustandsgrößen von Einlaufkanal $\Delta\pi_E$, Verdichter ($\Delta W_{r,v}$, $\Delta\eta_v$), Brennkammer $\Delta\eta_B$, HD-Turbine ($\Delta W_{r,HDT}$, $\Delta\eta_{HDT}$), Nutzturbine ($\Delta W_{r,NT}$, $\Delta\eta_{NT}$) sowie Abgaskanal $\Delta\pi_A$ berücksichtigt. Demnach zeigt Version 1, dass der neue Verdichter einen um 0,5% besseren Wirkungsgrad als der Referenzzustand hat. Derjenige der Hochdruckturbinen ist um 0,6% besser, was auf die reduzierte Leckage, wodurch die Hauptströmung weniger gestört wird, zurückgeführt werden kann. Die neue Nutzturbine hat eine um 1,9% kleinere Kapazität und ihr verkleinerter Radialsplatt verbessert den Wirkungsgrad um 0,9%.

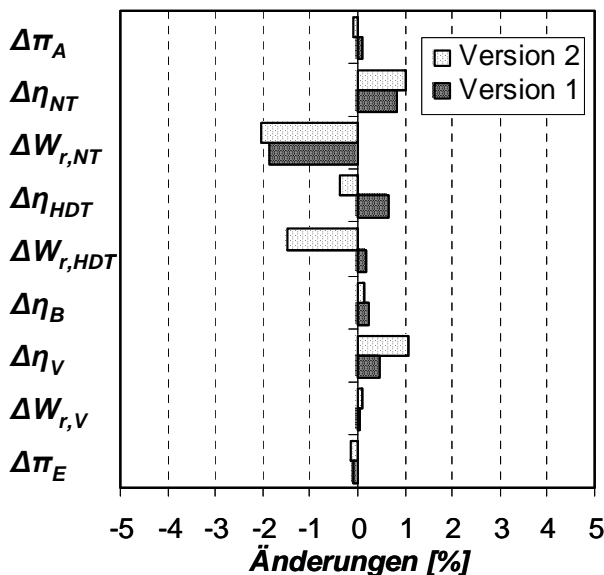


BILD 11: Ergebnis einer Zustandsanalyse mit zwei Rechenversionen mit den Messgrößen P_3 für Version 1, S_{3I} für Version 2

Bei der Version 2 wurde statt des totalen Drucks der statische Druck am Verdichteraustritt verwendet. Gegenüber dem Referenzzustand ist der Verdichtereffizienz um 1,1% höher, der HDT-Wirkungsgrad um 0,4% niedriger und rechnerisch die HDT-Kapazität um 1,5% kleiner. Da der Leitkranz im neuen Aufbau gleich dem Referenzaufbau ist, darf es keine Änderung der HDT-Kapazität geben. Ihre Abnahme bedeutet, dass die Leckage mehr zurückgegangen ist als in der Rechnung angenommen wurde. Wird dieser Leckagerückgang von 1,5% bei der Analyse berücksichtigt, wird der HDT-Wirkungsgrad gegenüber dem Referenzzustand rechnerisch weiter abfallen. Dieses Ergebnis ist

insofern widersprüchlich als eine Leckageverringern einen Wirkungsgradanstieg durch eine aerodynamische Verbesserung hervorrufen müsste. Folglich ist das Analyseergebnis Version 1 plausibler als Version 2. Dies wird auch durch die Berücksichtigung zusätzlicher Informationen bestätigt.

7. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten liegt auf den modellbasierten Analyseverfahren zur Ermittlung der Zustandsgrößen. Diese Verfahren haben sich bewährt, so dass sie als Standardverfahren in der Industrie angewendet werden. Forschungen auf dem Gebiet der Simulationstechnik sollen die Modellverfeinerungen noch weiter vorantreiben.

Um Messfehler besser detektieren und eliminieren zu können wäre es von Nutzen, die Analyse auf Basis von Analysemodellen und die Analyse auf Basis von linearen Modellen in einem Verfahren zu kombinieren

Ein genauso wichtiger Teil der Analyse ist die Interpretation der Rechenergebnisse. Um sicherer zu einer richtigen Interpretation zu gelangen wurden bereits Ansätze auf der Basis von Expertensystemen erarbeitet. Diese könnten ein Ansatzpunkt für weitere Forschungen in diese Richtung sein.

Die Autoren danken ihren Kollegen für die Unterstützung bei der Realisierung und der MTU Aero Engines für die Genehmigung der Veröffentlichung dieser Arbeit.

8. LITERATUR

- [1] H. Abdullahi, M. Kotulla, S. Staudacher: A New Method for Online Monitoring and Trimming of Pyrometer Measurements in High Performance Turbo Engines, AIAA paper number 2003_1195
- [2] R.E. Kalman: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Trans. of ASME, Journal of Basic Engineering, März 1960
- [3] A. H. Jazwinski: Stochastic Process and Filtering Theory, Academic Press, New York, London 1970
- [4] H. Abdullahi: Gas turbine engine model with neural network for operating behaviour simulation, Proceedings IGTC'99 Kobe TS-16, Pages 389-396
- [5] H. Abdullahi, B. Kurpjuhn, M. Reiser, A. Spirkel: Sand ingestion tests on the MTR390 turboshaft engine, European rotorcraft forum, 1998 Proceedings, Paper ep03, pages 1-9
- [6] L. A. Urban: Gas path analysis – A tool for engine condition monitoring, 3rd Annual International Air Safety Seminar. Christchurch, 1980
- [7] A. J. Volponi: Sensor errors compensation in engine performance diagnostics. ASME paper 94-GT-58