

BEEINFLUSSUNG DES TRANSIENTEN VERHALTENS VON ZWEIWELLEN TURBOFANTRIEBWERKEN BEI WELLENLEISTUNGSENTNAHME

G. Borchers*, S. Staudacher**, D. Giesa***, M. Panzner***

* FTI Engineering Network GmbH
Ludwig-Erhard-Ring 8
15827 Blankenfelde-Mahlow

** Institut für Luftfahrtantriebe
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 6
70569 Stuttgart

*** Rolls-Royce Deutschland Ltd &
Co KG
Eschenweg 11
15827 Blankenfelde-Mahlow

Zusammenfassung

Ein Anstieg des Bedarfs an elektrischer Leistung an Bord von Flugzeugen führt zu einer Erhöhung der Entnahme von Triebwerkswellenleistung. Bei Zweiwellentriebwerken wird die Leistung bevorzugt der Hochdruckwelle entnommen, was zu einer Anhebung der Verdichterarbeitslinie führt. Speziell bei sprunghaften Änderungen der entnommenen Wellenleistung kann es zusätzlich noch durch die Reaktion des Kontrollsystems zu einer weiteren Reduktion des Pumpgrenzenabstandes kommen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss von verschiedenen Stellgrößen auf das transiente Verhalten des Triebwerks während eines Lastwechsels untersucht. Des Weiteren wird der Einfluss des Massenträgheitsmomentes auf die maximale Arbeitslinienauslenkung durch einen sprunghaften Lastwechsel analysiert. Die Untersuchungen werden exemplarisch für zwei Flugfälle durchgeführt.

1. ABKÜRZUNGEN

| Abk. | Einheit | Beschreibung |
|-------------------|---|-------------------------------------|
| A/L | - | Arbeitslinie |
| \dot{m}_B | [kg/sec] | Brennstoffmassenstrom |
| HBV | - | Handling Bleed Valve |
| NH | [RPM] | Hochdruckwellendrehzahl |
| π_{HDV} | [-] | Hochdruckverdichter Druckverhältnis |
| PID | - | Proportional Integral Differential |
| VSV | - | Variable Stator Vanes |
| \dot{m}_{red26} | $\left[\frac{kg \cdot \sqrt{K}}{sec \cdot Pa} \right]$ | Reduzierter Massenstrom (Ebene 26) |

2. EINFÜHRUNG

Der Bedarf an elektrischer Leistung an Bord von Flugzeugen steigt stetig. Dies ist unter anderem auf die stark wachsende Anzahl an elektrischen Systemen zur Flugzeugführung und den gesteigerten Passagierkomfort zurückzuführen [1, 2]. Ein weiterer überproportional großer Anstieg des elektrischen Energiebedarfs ist von der so genannte „More-Electric“ Technologie zu erwarten [3]. Hierbei wird unter anderem Kabinenbedruckung und Vereisungsschutz nicht mehr mittels heißer Druckluft aus dem Triebwerksverdichter, sondern mittels elektrischer Energie betrieben. Dies führt dazu, dass dem Hochdruckverdichter keine pneumatische Energie mehr entnommen wird, sondern mechanische Energie zum Antrieb von

elektrischen Generatoren. Die „More-Electric“ Technologie kann für Triebwerke der Rolls-Royce BR700-Serie beim Einsatz an Geschäftsflugzeugen einen Anstieg des elektrischen Leistungsbedarfs um den Faktor 3,5 zur Folge haben. In Fehlerfällen kann es so zu einer schlagartigen Leistungsentnahme von bis zu etwa 260 kW kommen [4]. Da bei Zweiwellen-Turbofantriebwerken aufgrund niedrigerer Drehzahlschwankungen die Wellenleistung vorzugsweise von der Hochdruckwelle entnommen wird, führen Fehlerfälle zu einer starken Verzögerung der Hochdruckwelle. Dieser Verzögerung folgt eine große Regelabweichung und somit eine schnelle Erhöhung des Kraftstoffmassenstroms durch den Triebwerksregler. Dieser schnelle Anstieg des Kraftstoffes führt zu einer starken thermischen Drosselung des Triebwerks und folglich zu einer Erhöhung des Verdichterdruckverhältnisses. Es folgt zusammen mit der Verzögerung der Wellendrehzahl eine starke Auslenkung der transienten Arbeitslinieline im Hochdruckverdichterkennfeld und somit eine Reduktion der Stabilitätsreserve (BILD 1). Abhängig vom Flugzustand des Triebwerks und von der Menge der entnommenen Wellenleistung kann diese Stabilitätsreserve ganz aufgebraucht werden und es so zu zum Verdichterpumpen kommen.

Der größte Teil (~75%) dieser Arbeitslinienauslenkung ist stationär und lässt sich im Betrieb nur durch die Entnahme von Verdichterzapflut beeinflussen. Die restlichen ca. 25 % sind im Allgemeinen darauf zurückzuführen, dass die neue stationäre Arbeitslinie bei deutlich niedrigeren Drehzahlen erreicht wird und eine weitere Kraftstofferhöhung kommandiert wird. Dies führt dann zu einer Art Überspringen über die neue stationäre Arbeitslinie im Verdichterkennfeld hinaus (BILD 1).

Innerhalb dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit ein Regelsystem angepasst werden kann, um dieses Überspringen im Verdichterkennfeld zu minimieren oder gar

ganz zu vermeiden. Es wird untersucht, wie sich die Änderungsrate des Brennstoffmassenstroms (\dot{m}_B) und der Einsatz der variablen Leitgitter am Verdichtereintritt für diese Optimierung eignen. Darüber hinaus wird das Abblasen von Verdichterzapflut zur Absenkung der transienten Arbeitslinie während eines Lastwechsels analysiert.

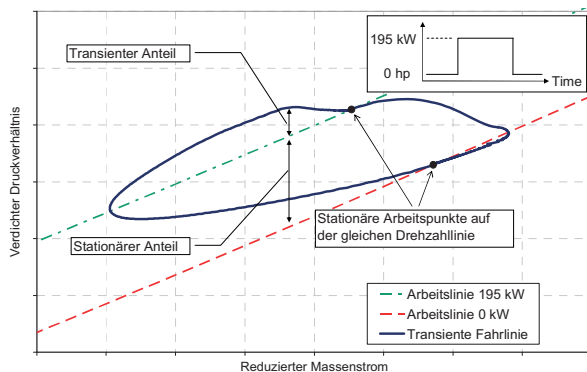


BILD 1 – Verdichterkennfeld mit transientser Arbeitslinie bei einem Lastsprung von 0 auf 195 kW und zurück auf 0 kW

Das Massenträgheitsmoment der Hochdruckwelle beeinflusst sehr stark das Drehzahlverhalten der Welle nach dem Aufbringen einer Last. Da die Verzögerung der Welle auch ein wichtiger Faktor bei der resultierenden Arbeitslinienauslenkung sein kann, wurde der Einfluss des Massenträgheitsmoments auf die transiente Arbeitslinie untersucht. Dazu wurde das nominelle Moment um $\pm 25\%$ variiert und der Einfluss auf die maximale Arbeitslinienauslenkung ermittelt.

3. MODELLIERUNG

Die Simulationen wurden an einem validierten Triebwerksmodell der BR700-Familie durchgeführt, bestehend aus einem thermodynamischen Modell zur Simulation des Triebwerks und einem weiteren Modell für den Triebwerksregler. Im vorliegenden Fall wird das Triebwerk nach der Hochdruckwellendrehzahl geregelt. Dies ist die typische Regelgröße im Leerlauf. Der Drehzahlregler ist als PID-Regler mit Vorsteuerung ausgeführt. (BILD 2).

Zusätzlich verfügt der Regler über eine spezielle Beschleunigungsregelung. Die Beschleunigung wird dabei so geregelt, dass die Auslenkung der transienten Arbeitslinie im Verdichterkennfeld einen bestimmten Wert nicht überschreitet. Die zulässigen Arbeitslinienauslenkungen ergeben sich aus den geforderten Beschleunigungszeiten und der vorhandenen Verdichterstabilitätsreserve. Als Vorsteuerung errechnet ein linearisiertes, inverses Triebwerksmodell aus diesen Beschleunigungswerten eine notwendige Änderung des Brennstoffmassenstroms.

Bei schnellen Änderungen der Führungsgröße (z.B. Schubhebel) kann der Regelfehler sprunghaft anwachsen und der kommandierte Brennstoffmassenstrom dadurch sehr schnell ansteigen. Die dadurch hervorgerufene schlagartige thermische Drosselung des Verdichters könnte zu einem Strömungsabriss an den Verdichterschaukeln und damit zum Pumpen des Verdichters führen. Um eine Unterschreitung des minimalen Pumpgrenzabstandes zu vermeiden, wird die Änderungsrate des Kraft-

stoffmassenstroms zusätzlich begrenzt. Die Begrenzung ist so ausgelegt, dass eine gewisse Arbeitslinienauslenkung nicht überschritten werden kann. Bei niedrigen Drehzahlen hat eine Erhöhung des Brennstoffmassenstroms eine größere Arbeitslinienauslenkung zur Folge. Aus diesem Grund ist bei niedrigen Drehzahlen die Änderungsrate deutlich mehr begrenzt als bei hohen Drehzahlen.

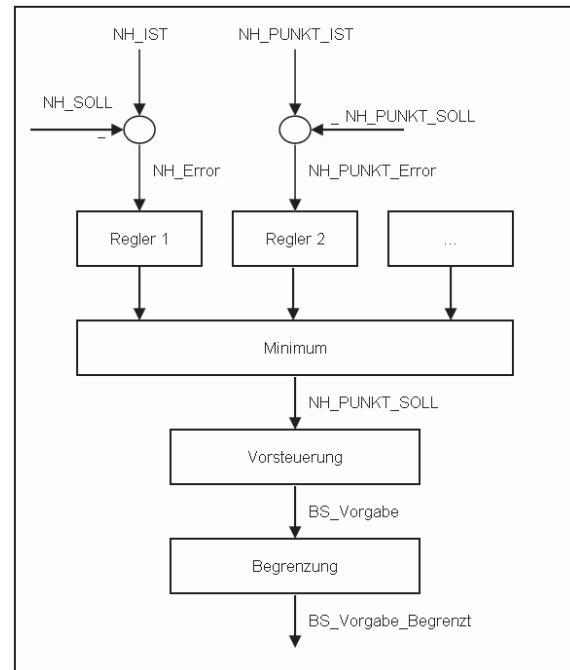


BILD 2 – Regelstrecke zur Regelung der minimalen Drehzahl (Regler 1) und der maximalen Beschleunigung (Regler 2) der Hochdruckwellendrehzahl (BS = Brennstoffmassenstrom)

Die simulierte Lastentnahme an der Hochdruckwelle baut sich innerhalb von 100 ms auf, liegt dann für 10 s an und baut sich innerhalb von 100 ms wieder ab. Durch diese steile Rampe können die Einflüsse einer Lastentnahme sehr deutlich demonstriert werden.

4. EINFLUSS HERKÖMMLICHER STELLGRÖSSEN

Ein typisches Regelsystem eines zivilen Turbofan Triebwerks verfügt über die folgenden drei Stellgrößen zur Steuerung und Beeinflussung des Triebwerksverhaltens:

- Brennstoffmassenstrom
- Variable Verdichterschaukeln
- Verdichterabblasventile

Im Folgenden wird detailliert untersucht, wie stark bei Lastwechseln das Überschwingverhalten der transienten Arbeitslinie (BILD 1) über die stationäre Arbeitslinie hinaus mit dem Brennstoffmassenstrom und den variablen Verdichterschaukeln minimiert werden kann. Des Weiteren wird der Effekt von abgeblasener Verdichterzapflut auf die absolute Arbeitslinienauslenkung während eines Lastwechsels untersucht.

4.1. Brennstoffmassenstrom

Bei einer schlagartigen Entnahme von Wellenleistung kommt es zu einer schnellen Verzögerung der Hochdruckwelle. Die daraus resultierende Regelabweichung hat eine starke Erhöhung des Kraftstoffmassenstroms zur Folge. Je geringer die zugegebene Treibstoffmenge ist, desto langsamer wird der Verzögerung der Hochdruckwelle entgegengewirkt und desto größer ist der Maximalwert der Verzögerung (BILD 3 und BILD 4). Bei einer langsamen Erhöhung des Brennstoffmassenstroms besteht beim Erreichen des neuen stationären Brennstoffmassenstroms immer noch eine große Regelabweichung, so dass der Brennstoff zum Beschleunigen des Triebwerks weiter erhöht werden muss. Dies führt zu einer größeren Arbeitslinienauslenkung als es bei höheren Änderungsraten des Brennstoffmassenstroms der Fall ist.

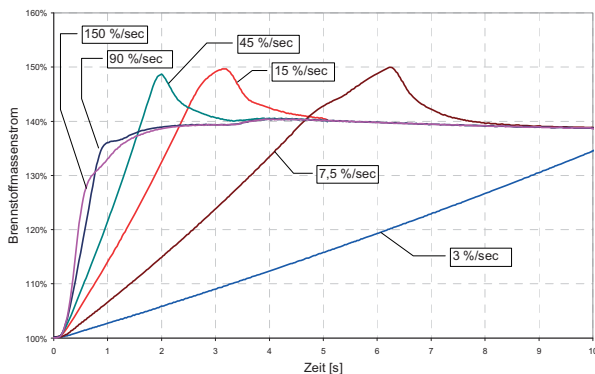


BILD 3 - Brennstoffverlauf bei verschiedenen Änderungs-raten, normiert auf den Ausgangsmassenstrom

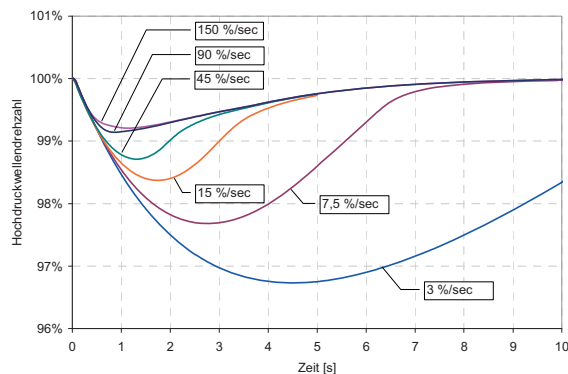


BILD 4 - Drehzahlverlauf bei verschiedenen Änderungs-raten des Brennstoffmassenstroms

Die Leistung der Hochdruckturbinen ist proportional zu Luftmassenstrom und Enthalpieänderung in der Hochdruckturbinen. Die Enthalpieänderung ist abhängig von der Turbineneintrittstemperatur und somit vom Brennstoffmassenstrom. Da bei niedrigen Drehzahlen der Luftmassenstrom niedriger ist, führt eine Änderung des Brennstoffmassenstroms bei niedrigeren Drehzahlen zu einer geringeren Überschussleistung als bei hohen Drehzahlen. Da das Trägheitsmoment drehzahlunabhängig ist beschleunigt das Triebwerk bei niedrigeren Drehzahlen, mit niedrigeren Überschussleistungen, langsamer. Da die Hochdruckwelle langsamer Beschleunigt erhöht sich auch der Massenstrom durch das Kerntriebwerk langsamer. Die

zur Beschleunigung notwendige Erhöhung des Brennstoffmassenstroms führt zur thermischen Drosselung des Hochdruckverdichters und damit zu einer Erhöhung des Verdichterdruckverhältnisses. Dies führt zusammen mit dem langsamer ansteigenden Massenstrom zu einer höheren Arbeitslinienauslenkung bei niedrigen Drehzahlen. Aus diesem Grund muss die maximale Änderungsrate des Brennstoffmassenstroms bei niedrigen Drehzahlen niedriger sein als bei hohen Drehzahlen.

Zur Minimierung der Arbeitslinienauslenkung bei sprungartigen Lastwechseln muss allerdings wegen der relativ geringen Turbinenleistung gerade bei niedrigen Drehzahlen die Zeit bis zum Erreichen der neuen, stationären Kraftstoffmenge möglichst gering gehalten werden. Da die Differenz zwischen dem stationären Brennstoffmassenstrom mit und ohne Wellenlast unabhängig von der Drehzahl annähernd konstant ist, bedeutet dies, dass eine hohe Änderungsrate bei niedrigen Drehzahlen notwendig ist. Das Optimum für sprungartige Lastwechsel unterscheidet sich also von dem für die normale Triebwerksbeschleunigung.

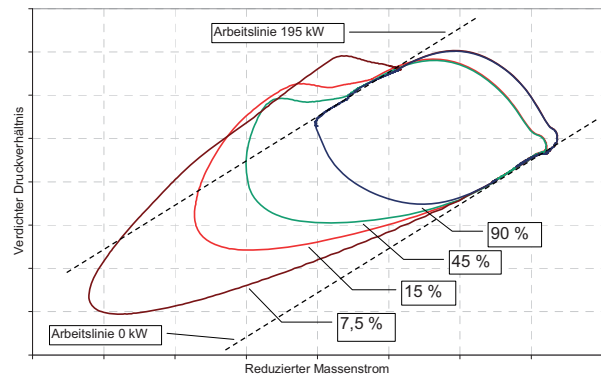


BILD 5 - Verdichterkennfeld bei verschiedenen Änderungs-raten des Brennstoffmassenstroms

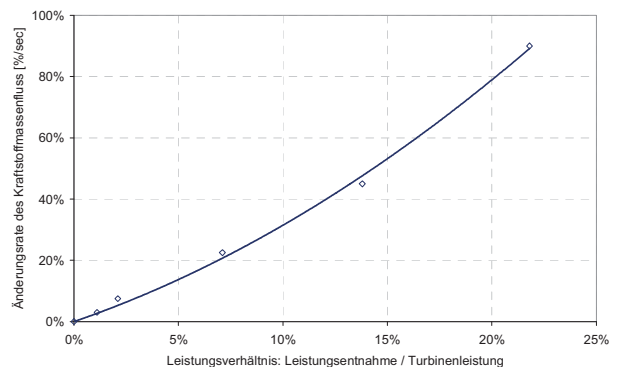


BILD 6 - Optimale Änderungsrate des Kraftstoffmassenstroms für die schlagartige Entnahme von Wellenleistung für 51.000 ft, Mach 0,7 und ISA Temperatur

Eine schnelle Erhöhung des Kraftstoffmassenstroms verhindert eine unnötige thermische Androsselung des Verdichters und hält damit die Arbeitslinienauslenkung auf dem stationären Wert (BILD 5). Bei niedrigen Drehzahlen und somit hohen Leistungsverhältnissen zwischen Turbinen und Wellenlast wächst die notwendige Änderungsrate des Kraftstoffs auf 90%/sec, beispielhaft für den gezeigten Flugfall. Bei geringeren Leistungsverhältnissen nimmt die

Rate ab, da die Welle langsamer verzögert oder vor dem Lastwechsel bereits ein höherer Brennstoffmassenstrom vorliegt und somit der neue stationäre Kraftstoffmassenstrom ausreichend schnell erreicht werden kann (BILD 6).

Betrachtet man die maximale Arbeitslinienauslenkung in Abhängigkeit von der Änderungsrate des Brennstoffs (\dot{m}_B), so erkennt man, dass eine Erhöhung der Rate auf diesen Grenzwert (BILD 6) eine deutliche Verbesserung zur Folge hat (BILD 7). Dies ist auch bei sehr niedrigen Lastsprüngen zu erkennen. Folglich sollte im Falle eines Lastsprunges die Änderungsrate des Brennstoffs deutlich nach oben korrigiert werden um das transiente Überschwingen auf ein Minimum zu begrenzen.

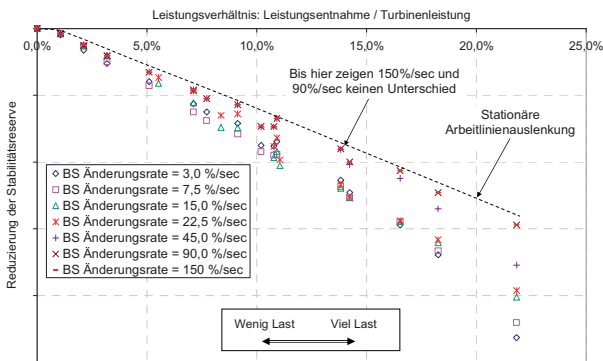


BILD 7 – Einfluss der maximalen Änderungsrate des Kraftstoffmassenstroms auf die maximale Arbeitslinienauslenkung

4.2. Variable Verdichter Leitschaufeln

Der Hochdruckverdichter der BR700 Triebwerksfamilie von Rolls-Royce ist mit verstellbaren Leitschaufeln an den ersten 4 Stufen ausgestattet. Die Hauptaufgabe der Leitschaufelverstellung ist es, die Strömungsverhältnisse im Teillastbereich so zu verbessern, dass für alle Manöver ausreichend Pumpgrenzabstand vorhanden ist. Eine Verstellung der Leitschaufeln führt zu einer Veränderung der Strömungsverhältnisse im Verdichter und damit zu einer Verschiebung des Verdichterkennfeldes. In erster Linie beeinflusst die Leitschaufelverstellung den Verdichtereffizienzgrad, die Leistungsaufnahme, die Pumpgrenze sowie das Verhältnis zwischen Drehzahl, Massenstrom und Druckverhältnis. Die Wirkung einer Leitschaufelverstellung auf das thermodynamische Gleichgewicht des Triebwerks bei konstantem Brennstoffmassenstrom ist im Folgenden beschrieben.

- VSV Öffnen (Definition: negativer Winkel) bewirkt,

eine stärkere Belastung der vorderen Stufen des Verdichters durch einen steileren Anstellwinkel. Unmittelbar nach dem Stellvorgang ist die Leistungsbilanz negativ. Das bedeutet, dass der Verdichter bei der Ausgangsdrehzahl mehr Leistung benötigt als die Turbine zur Verfügung stellt. Allerdings haben das höhere Druckverhältnis und der höhere Massenstrom eine Erhöhung der Turbinenleistung zur Folge. Bei konstantem Brennstoffmassenstrom kommt es kurzzeitig zu einer Reduktion der Drehzahl und anschließend, stationär zu einer Erhöhung.

- VSV Schließen (Definition: positiver Winkel) bewirkt,

eine Entlastung der vorderen Stufen des Verdichters durch einen flacheren Anstellwinkel der Schaufeln. Die Leistungsbilanz wird anfangs positiv, da der Verdichter bei der anfänglichen Drehzahl weniger Leistung umsetzt als die Turbine der Strömung entzieht. Dies führt kurzfristig zu einer Beschleunigung der Hochdruckwelle. Schließen der VSV führt allerdings auch zu einer Reduktion des Druckverhältnisses und des Luftmassenstroms. Bei konstantem Brennstoffmassenstrom kommt es nach der anfänglichen Drehzahlerhöhung zu einer Reduktion der Drehzahl.

Im Folgenden ist beschrieben, wie sich eine Leitschaufelverstellung im Zusammenhang mit einem Lastwechsel positiv auf die Arbeitslinienauslenkung auswirken kann. Die Untersuchungen werden hier prinzipiell für einen Triebwerkszustand vorgestellt. Die optimalen Öffnungs- und Schließzeiten der VSV variieren stark mit der Triebwerksleistung und den Umgebungsbedingungen. Der nominelle VSV Winkel ist von der reduzierten Drehzahl abhängig. Die Beschriebenen Änderungen des VSV Winkels sind immer bezogen auf den nominellen VSV Winkel.

Ansatz I - Öffnen der VSV:

Durch Öffnen der VSV erhöhen sich das Druckverhältnis und der Massenstrom des Verdichters und dadurch auch die Leistung der Turbine. Ebenfalls, führt ein Öffnen der VSV zu einer Verschiebung des Arbeitspunktes bei gleicher Drehzahl zu höheren Massenströmen und Druckverhältnissen. Dadurch hat die transiente Arbeitslinie zwar bei höheren Massenströmen ihren Wendepunkt, es findet dann aber eine längere Beschleunigung zum neuen Arbeitspunkt statt. Durch die Regelung der Beschleunigung ergibt sich eine ähnliche Arbeitslinienauslenkung wie beim Lastwechsel ohne VSV Verstellung (BILD 8).

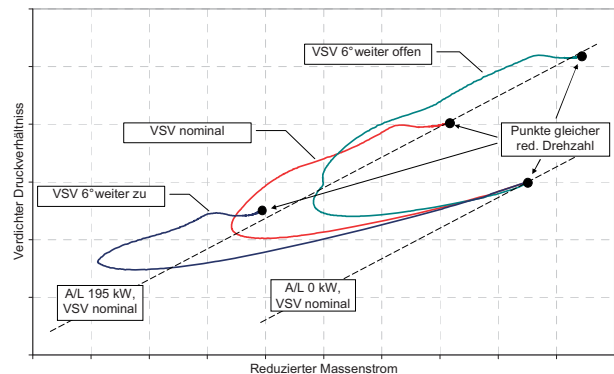


BILD 8 – Verdichterkennfeld bei einem Lastwechsel zusammen mit einem Öffnen/Schließen der VSV (2 Sekunden) nach Aufbringen der Wellenlast innerhalb

Ansatz II - Schließen der VSV:

Ein Schließen der VSV während eines Lastwechsels ist gerade im unteren Drehzahlbereich sinnvoll, da es im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Stabilitätsreserve führt.

Jedoch verschiebt Schließen der VSV den Arbeitspunkt bei gleicher Drehzahl zu niedrigeren Massenströmen und niedrigeren Druckverhältnissen. Das bedeutet, dass Schließen der VSV zwar gut hinsichtlich der Stabilitätsre-

serve sein kann, der Massenstrom allerdings auch deutlich reduziert wird. Dies führt dann auch zu einer Reduktion der Turbinenleistung und letztendlich auch zum weiteren Absenken der Hochdruckwellendrehzahl. (BILD 8). Durch die größere Verzögerung kommt es dann auch zu einer größeren Arbeitslinienauslenkung bei der anschließenden Beschleunigung. Exemplarisch wurde ein Flugfall bei 51.000 ft analysiert (BILD 9). Die erhöhte Arbeitslinienauslenkung muss in der Praxis mit der erhöhten Stabilitätsreserve verglichen werden um zu beurteilen ob ein Schließen der VSV noch sinnvoll ist.

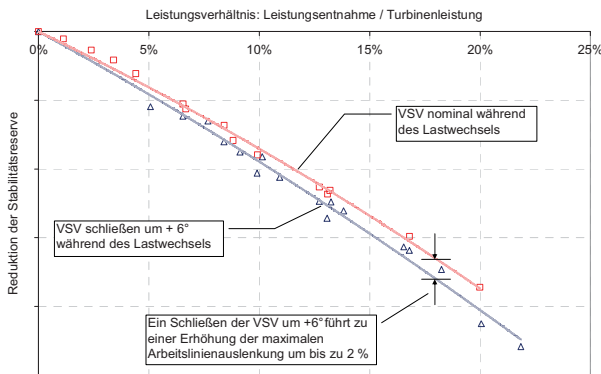


BILD 9 – Einfluss um 6° weiter geschlossener VSV während eines Lastwechsels. VSV werden parallel zur Erhöhung der Wellenlast mit 3°/sec geschlossen

Ansatz III - Öffnen und wieder Schließen der VSV:

Um die Reduktion des Massenstroms zu verringern und gleichzeitig die positiven Effekte der geschlossenen VSV zu nutzen, sollen die VSV nun unmittelbar nach dem Öffnen wieder geschlossen werden. Dieser Ansatz führt im Allgemeinen dazu, dass der Wendepunkt der transienten Arbeitslinie (ungefähr niedrigste Drehzahl) zwar bei höheren Massenströmen im Verdichterkennfeld liegt, die maximale Arbeitslinienauslenkung allerdings ungefähr gleich bleibt. Allerdings ist die transiente Arbeitslinie im Verdichterkennfeld stark abhängig vom Flugzustand und der Verstellgeschwindigkeiten der VSV. Aus diesem Grund ist es sehr kompliziert allgemeine Regeln für die VSV Verstellung abzuleiten. Die Schließgeschwindigkeit wirkt sich wie folgt aus:

(1) Zu langsames Schließen der VSV:

führt zu keinen negativen Effekten hinsichtlich der Arbeitslinienauslenkung. Wenn die stationäre Drehzahl erreicht ist, bevor die VSV wieder geschlossen werden, kommt es zu einer Art Überspringen im Verdichterkennfeld. Allerdings wird bei einem zu langsamen Schließen die maximale Arbeitslinienauslenkung erreicht während die VSV noch nicht wieder ihrer Ausgangsposition erreicht haben. Dies kann zu einer Reduktion der Stabilitätsreserve führen, bzw. der positive Effekt von geschlossenen VSV kann nicht genutzt werden (BILD 10).

(2) Zu schnelles Schließen der VSV:

führt kurz nach dem Erreichen der minimalen Drehzahl dazu, dass der Massenstrom wieder sinkt und der erzielte Gewinn durch das vorhergehende Öffnen der VSV wieder rückgängig gemacht wird (BILD 10).

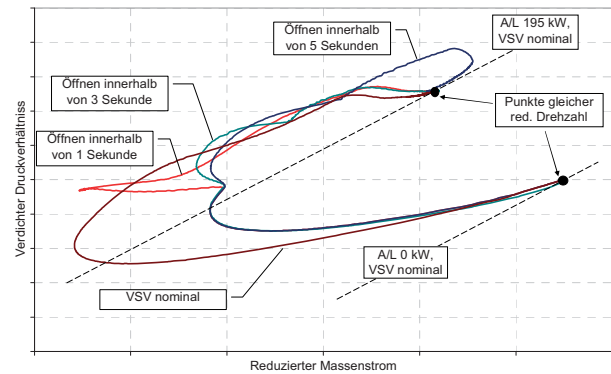


BILD 10 - Lastwechsel zusammen mit Öffnen der VSV (2 Sek.) und anschließendem Schließen (1, 3, 5 Sek.)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch ein Öffnen gefolgt von einem Schließen der VSV die Massenstromreduktion minimiert werden kann, wenn sich die VSV nicht zu schnell wieder schließen. Die maximale Arbeitslinienauslenkung kann auf diese Weise allerdings nicht verringert werden, da sie in erster Linie durch die Beschleunigung der Hochdruckwelle und damit vom Triebwerksregler abhängig ist. Die optimalen Verstellgeschwindigkeiten und Verstellwinkel sind sehr stark abhängig von der Flugbedingung und der Hochdruckwellendrehzahl. Um die verstellbaren Leitschaufeln im Zusammenhang mit einem Lastwechsel zu nutzen ist eine genaue Analyse über den gesamten Flugbereich des Triebwerks notwendig.

4.3. Entnahme von Verdichterzapfluft

Der Hochdruckverdichter der BR700 Triebwerksfamilie von Rolls-Royce ist mit 3 Zapfluftventilen hinter der fünften Verdichterstufe und mit einem hinter der achten Verdichterstufe ausgestattet. So können insgesamt hinter der fünften Stufe 13,5 % und hinter der achten Stufe 9 % des Luftmassenstroms entnommen werden. Durch die Entnahme von Verdichterzapfluft werden zum einen der Luftmassenstrom und die Strömungsgeschwindigkeit hinter den Ventilen reduziert und zum anderen wird die Arbeitslinie abgesenkt. So kann ein Sperren des Verdichters im unteren Drehzahlbereich verhindert und gleichzeitig der Pumpgrenzabstand vergrößert werden. Dieser Effekt kann während eines Lastwechsels genutzt werden um die transienten Arbeitslinie abzusinken. Die Entnahme von 4,5 % Zapfluft hinter der fünften Stufe führt zu einer Absenkung der stationären Arbeitslinie um etwa 6 %, während die transienten Arbeitslinienauslenkung nur um etwa 5 % reduziert wird. Dies kommt zum einen daher, dass die Zapfluftventile aufgrund der Trägheit des Regelsystems und der Ventile erst 100 ms nach dem Aufbringen der Wellenlast geöffnet werden. Zum anderen liegt es daran, dass durch das Öffnen der Zapfluftventile bereits komprimierte Luft im Verdichter in den Nebenstrom geblasen wird und damit bereits verrichtete Arbeit dem Kerntriebwerk entzogen wird. Dies führt zu einer Verschlechterung des Verdichtereffizienzgrades und somit zu einer Vergrößerung der Arbeitslinienauslenkung nach einem Lastwechsel im Vergleich zu dem Lastwechsel ohne Zapfluentnahme (BILD 11 und BILD 12).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Abblasen von Verdichterzapfluft zu einer deutlichen Absenkung

der transienten Arbeitslinie führt. Berücksichtigt werden sollte allerdings noch, dass durch das Öffnen von Verdichterzapfluvventilen auch die Stabilitätsgrenze des Verdichters beeinflusst werden kann. Wie sich die Pumpgrenzreserve durch das Öffnen eines Zapfluvventils verhält ist stark abhängig von der Drehzahl und dem individuellen Verdichterverhalten. In bestimmten Fällen kann sich der Pumpgrenzabstand auch verringern.

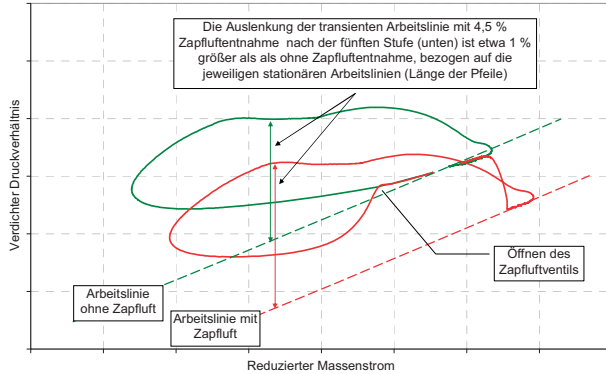


BILD 11 - Verdichterkennfeld mit und ohne Abblasen von 4,5 % Verdichterzapfluff nach der fünften Stufe bei 51.000 ft

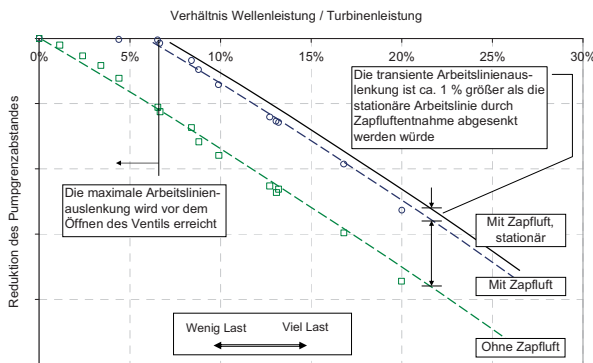


BILD 12 - Verringerung der Arbeitslinienauslenkung durch Abblasen von 4,5 % Verdichterzapfluff nach der fünften Stufe bei 51.000 ft

5. EINFLUSS DES MASSENTRÄGHEITSMOMENTES

Da das Massenträgheitsmoment der Hochdruckwelle die Verzögerung der Welle nach dem Aufbringen einer Last sehr stark beeinflusst und dies ein wichtiger Faktor bei der resultierenden Arbeitslinienauslenkung sein kann, wurde der Einfluss des Massenträgheitsmoments auf die transiente Arbeitslinie untersucht. Dazu wurde bei einer Serie von Lastwechseln bei 51.000 ft und bei -2.000 ft das Trägheitsmoment um jeweils $\pm 25\%$ variiert.

Mit Hilfe des Drallsatzes ergibt sich das folgende Momentengleichgewicht für die Hochdruckwelle:

$$(1) \quad \Sigma M_{HD} = \frac{d\omega_{HD}}{dt} \cdot \Sigma J_{HD}$$

| | |
|---------------|--|
| M_{HD} | Beschleunigungsmoment der Hochdruckwelle |
| ω_{HD} | Winkelgeschwindigkeit der Hochdruckwelle |
| J_{HD} | Trägheitsmoment der Hochdruckwelle |

Das Beschleunigungsmoment der Hochdruckwelle vor dem Lastsprung ist gleich null, da sich das Triebwerk im stationären Gleichgewicht befindet ($d\omega_{HD}/dt = 0$). Das Kontrollsystem benötigt ungefähr 100 Millisekunden [4] um eine signifikante Änderung des Kraftstoffmassenstroms zu bewirken. Somit ist nach Gleichung 2, in den ersten 100 ms nach der Entnahme der Wellenlast die Verzögerung nur vom Trägheitsmoment und der Ausgangsdrehzahl abhängig.

$$(2) \quad P_{Last,HD} = \Sigma M_{HD} \cdot \omega_{HD} = \frac{d\omega_{HD}}{dt} \cdot \omega_{HD} \cdot \Sigma J_{HD}$$

$P_{Last,HD}$ Leistung, die der Hochdruckwelle entnommen wird

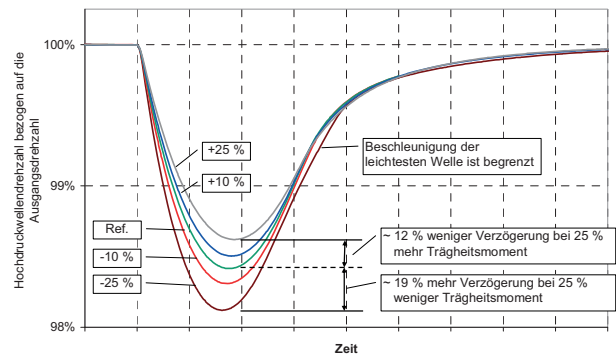


BILD 13 - Einfluss des Massenträgheitsmomentes auf die Drehzahl der Hochdruckwelle während eines Lastwechsels bei 51.000 ft

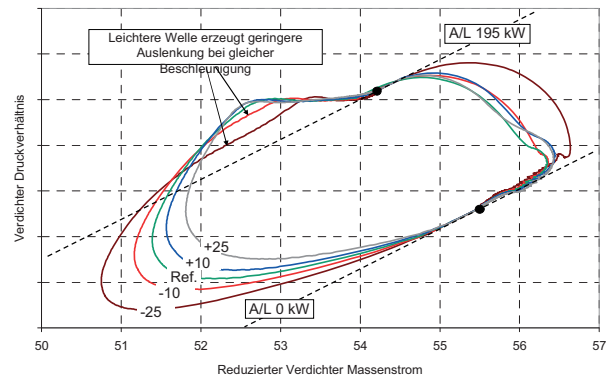


BILD 14 - Einfluss des Massenträgheitsmomentes auf die transiente Arbeitslinienauslenkung während eines Lastwechsels von 0 kW auf 195 kW bei 51.000 ft

Die stärkere Verzögerung einer leichteren Welle zu Beginn der Lastentnahme führt allerdings zu einer schneller wachsenden Regelabweichung (Bild 13) und damit zu einer größeren kommandierten Kraftstofferhöhung. Die Änderungsrate des Kraftstoffs wird im vorliegenden Fall allerdings unabhängig vom Trägheitsmoment auf das gleiche Maß begrenzt. Das bedeutet, anfangs ist die Kraftstofferhöhung unabhängig vom Trägheitsmoment der

Welle und von der daraus resultierenden Regelabweichung. Die leichte Welle reagiert auf die Erhöhung allerdings mit einer deutlich höheren Beschleunigung als die trägere Welle. Dies hat bei hohen Lasten zur Folge, dass die Kraftstoffhöhung zusätzlich durch das Erreichen der maximal zulässigen Beschleunigung nach oben begrenzt wird. Dies führt dann zu einer geringeren Arbeitslinienauslenkung als bei der trägeren Welle, da weniger Arbeit im Verdichter verrichtet werden muss (BILD 14).

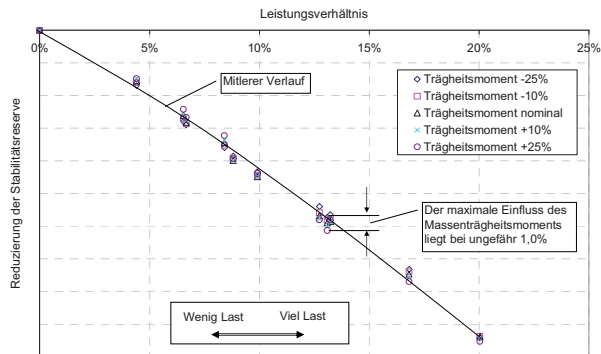


BILD 15 – Einfluss des Massenträgheitsmoments auf die maximale Arbeitslinienauslenkung bei 51.000 ft, ISA und Mach 0,7

Beim Aufbringen von niedrigen Wellenlasten ist insgesamt die Verzögerung der Welle so gering, dass die maximal zulässige Beschleunigung der Welle nicht erreicht wird und der Vorteil der geringeren Verzögerung bei der trägen Welle dominiert. Unabhängig davon ist der Einfluss des Trägheitsmomentes generell sehr gering. Bei 51.000 ft liegt der maximale Unterschied zwischen + 25 % und – 25 % Variation des Trägheitsmoments bei etwa 1,0 % Arbeitslinienauslenkung (BILD 15). Es ist ebenfalls zu erkennen, dass sich bei niedrigeren Wellenlasten ein hohes Trägheitsmoment der Welle eher positiv auf die maximale Arbeitslinienauslenkung auswirkt, während es bei hohen Wellenlasten eher negative Auswirkungen zeigt.

Bei – 2000 ft hat ein geringes Trägheitsmoment bei hohen Lasten eine Erhöhung der maximalen Arbeitslinienauslenkung um ca. 2 % zur Folge. Ein hohes Trägheitsmoment hat keinerlei positive Effekte (BILD 16).

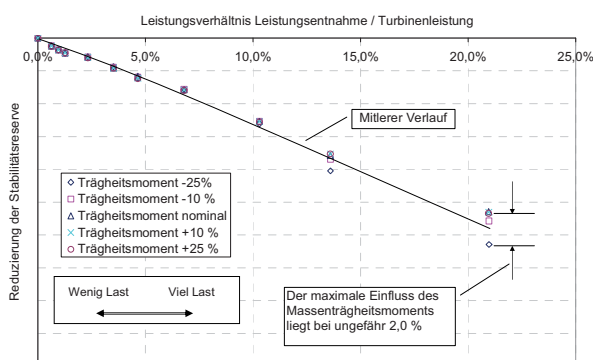


BILD 16 – Einfluss des Massenträgheitsmoments auf die maximale Arbeitslinienauslenkung bei – 2.000 ft, ISA und Mach 0,0

6. ZUSAMMENFASSUNG

Bei schneller Zunahme der entnommenen Wellenleistung kommt es zu einer Anhebung des Verdichterdruckverhältnisses über den stationären Wert hinaus. Es wurde untersucht, wie weit sich die transiente Arbeitslinie bei solchen Lastwechseln mit typischen Stellgrößen des Kontrollsystems (Brennstoffmassenstrom, variable Verdichterleitgitter und Verdichterabblasen) beeinflussen lässt. Die deutlichste Verbesserung kann mit einer Modifikation des Brennstoffmassenstroms erzielt werden. Die Begrenzung der Änderungsrate des Brennstoffmassenstroms für normale Beschleunigungsvorgänge führt bei schnellen Lastwechseln zu sehr starken Drehzahlverlusten und somit zu großen Arbeitslinienauslenkungen. Eine schnelle Erhöhung des Brennstoffmassenstroms minimiert die transiente Arbeitslinienauslenkung auf den stationären Wert.

Die maximale Arbeitslinienauslenkung kann durch einen Einsatz der VSV nicht minimiert werden. Es kann aber der minimale Verdichtermassenstrom während des Manövers zu höheren Werten hin verschoben werden. Öffnen der VSV erhöht zwar kurzzeitig den Massenstrom aber gleichzeitig verschiebt sich auch der Arbeitspunkt im Verdichterkennfeld hin zu höheren Massenströmen und damit verlängert sich die transiente Arbeitslinie während des Beschleunigungsvorgangs. Diese Beschleunigung und damit auch die Arbeitslinienauslenkung werden durch den Regler auf einen Maximalwert begrenzt. Ein Schließen der VSV entlastet den Verdichter kurzzeitig, reduziert allerdings den Massenstrom auch sehr stark und damit die Turbinenarbeit. Öffnen gefolgt von Schließen der VSV kann genutzt werden um die Massenstromreduktion zu verringern, allerdings nur, wenn sich die VSV nicht zu schnell wieder schließen. Die optimalen Verstellgeschwindigkeiten und der absolute Verstellwinkel sind sehr stark abhängig von der Flugbedingung und der Hochdruckwellendrehzahl.

Abblasen von Verdichterzapfluft führt zu einer deutlichen Absenkung der transienten Arbeitslinie. Da die Zapfluventile über eine gewisse Trägheit verfügen und das Abblasen von Verdichterzapfluft zu einer Verschlechterung des Verdichtereffizienzes führt, verringert sich aber der Nutzen um ca. 1 % im Vergleich zur stationären Arbeitslinienabsenkung für 4,5 % Zapfluft nach der fünften Verdichterstufe.

Im Anschluss wurde der Einfluss des Massenträgheitsmoments auf die transiente Arbeitslinie untersucht. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Variation des Trägheitsmomentes kaum Einfluss auf die maximale Arbeitslinienauslenkung hat. Ein niedriges Massenträgheitsmoment hat eine höhere Verzögerung der Hochdruckwelle zur Folge, die Arbeitslinienauslenkung ist jedoch in erster Linie von der maximalen Beschleunigung zurück zur Ausgangsdrehzahl durch den Regler begrenzt.

7. DANKSAGUNG

Die Autoren danken Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Forschungsprojekts.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Calinski, D. *Prognose des Leistungsbedarfs und der Masse elektrischer Bordnetze im Flugzeugentwurf*, in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. 2003. München.
2. Moir, I. *More-electric aircraft-system considerations*, in *Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft (Ref. No. 1999/180)*, IEE Colloquium on. 1999. London, UK.
3. Moir, I., *The All-Electric Aircraft - Major Challenges*. 1998, The Institute of Electrical Engineers.
4. Borchers, G., *Impact Of The High Electrical Power Demand Of Novel Aircraft Concepts On 2 Shaft Turbofans*, in *DGLR Jahrestagung*. 2009: Aachen.
5. Salchow, K., *Verbesserung des Betriebsverhaltens von Turboflugtriebwerken durch Leitgitterverstellung und Abblasung im Verdichter*. 2001, München VDI Verlag, Reihe 12, Nr. 476.
6. Walsh, P., Fletcher, P., *Gas Turbine Performance*. II ed. 2008 Blackwell Publishing Inc.
7. Bauerfeind, K., *Steuerung und Regelung der Turboflugtriebwerke*. 1999 Birkhäuser Verlag.