



(10) **DE 10 2016 202 370 A1** 2017.08.17

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 202 370.5**

(22) Anmeldetag: **17.02.2016**

(43) Offenlegungstag: **17.08.2017**

(51) Int Cl.: **G01M 15/00 (2006.01)**

(71) Anmelder:

MTU Aero Engines AG, 80995 München, DE

(72) Erfinder:

**Kando, André, 85221 Dachau, DE; Kotulla,
Michael, Dr., 12157 Berlin, DE; Bauer, Michael,
Dr., 81369 München, DE; Markert, Thomas, 80469
München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

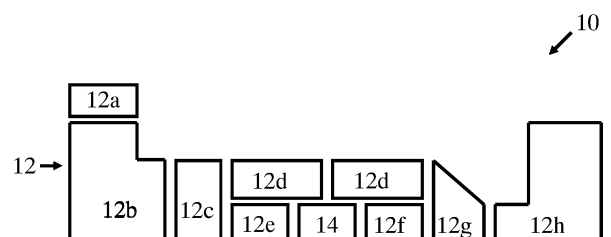
US	2007 / 0 276 601	A1
US	2008 / 0 228 338	A1

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Ermitteln eines Einflusses eines Innen-Prüfstands auf eine im Innen-Prüfstand betriebene Gasturbine**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Einflusses eines Innen-Prüfstands (12) auf eine im Innen-Prüfstand (12) betriebene Gasturbine (14), insbesondere eines Flugtriebwerks. Das Verfahren ermöglicht eine Trennung zwischen Zustandsgrößen der Gasturbine (14) und des Innen-Prüfstands (12). Diese Trennung wird möglich durch eine Analyse des Innen-Prüfstands (12) und der Gasturbine (14) unter Berücksichtigung eines thermodynamischen Modells, welches sowohl den Innen-Prüfstand (12) als auch die Gasturbine (14) abbildet. Die Erfindung betrifft weiterhin eine Recheneinrichtung zur Verwendung in einem solchen Verfahren.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Einflusses eines Innen-Prüfstands auf eine im Innen-Prüfstand betriebene Gasturbine. Die Erfindung betrifft weiterhin eine Recheneinrichtung zur Verwendung in einem solchen Verfahren.

[0002] Im Gegensatz zu einem Außen-Prüfstand (Outdoor-Prüfstand) kommt es beim Testbetrieb einer Gasturbine, beispielsweise eines Flugtriebwerks, in einem Innen-Prüfstand (Indoor-Prüfstand) zur Wechselwirkung zwischen der Performance der Gasturbine und der Performance des Innen-Prüfstands. Aus diesem Grund ist es erforderlich, für jede Gasturbine eine Korrelation zwischen einem Outdoor-Prüfstand und dem Indoor-Prüfstand durchzuführen. Die Korrelation bildet dabei die Unterschiede zwischen einem Test der Gasturbine in einem Indoor-Prüfstand und einem als Referenz dienenden Outdoor-Prüfstand ab.

[0003] Die Federal Aviation Administration (FAA) hat in ihrem „Advisory Circular AC43-207“ empfohlen, dass ein Innen-Prüfstand für In-Service Abnahmetest („Acceptance Test“) von Flugtriebwerken mindestens alle 7 Jahre neu korreliert werden muss. Darüber hinaus kann aber der Triebwerkshersteller (OEM) auch kürzere Zeitintervalle wie beispielsweise 5 Jahre vorschreiben. Solche Re-Korrelationstests sind allerdings sehr aufwändig und kostenintensiv. Daher ist es wünschenswert, den Beitrag von Innen-Prüfständen bzw. die Wechselwirkung zwischen einem Innen-Prüfstand und einer im Innen-Prüfstand betriebenen Gasturbine ermitteln zu können, um die Auswirkungen des Innen-Prüfstands auf die Messergebnisse der Gasturbine beurteilen und Aussagen über eine hypothetische Prüfung der Gasturbine in einem Außen-Prüfstand treffen zu können.

[0004] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren zum Ermitteln eines Einflusses eines Innen-Prüfstands auf eine im Innen-Prüfstand betriebene Gasturbine bereitzustellen, so dass eine Trennung der Einflüsse des Innen-Prüfstands von der Performance des Gastriebwerks ermöglicht wird. Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine Recheneinrichtung zur Verwendung in einem solchen Verfahren bereitzustellen.

[0005] Die Aufgaben werden erfindungsgemäß durch ein Verfahren den Merkmalen des Patentanspruchs 1 sowie durch eine Recheneinrichtung gemäß Patentanspruch 10 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen mit zweckmäßigen Weiterbildungen der Erfindung sind in den jeweiligen Unteransprüchen angegeben, wobei vorteilhafte Ausgestaltungen des ersten Erfindungsaspekts als vorteilhafte Ausgestaltungen des zweiten Erfindungsaspekts und umgekehrt anzusehen sind.

[0006] Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Einflusses eines Innen-Prüfstands auf eine im Innen-Prüfstand betriebene Gasturbine, insbesondere eines Flugtriebwerks. Erfindungsgemäß umfasst das Verfahren zumindest die Schritte Anordnen der Gasturbine im Innen-Prüfstand, Betreiben der Gasturbine im Innen-Prüfstand bei wenigstens einem ausgewählten Betriebspunkt der Gasturbine, Ermitteln wenigstens eines die Gasturbine im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden ersten Messwertes und wenigstens eines den Innen-Prüfstand während des Betriebs der Gasturbine im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden zweiten Messwertes mittels wenigstens einer Sensoreinrichtung, Bereitstellen eines thermodynamischen Modells mittels einer mit der Sensoreinrichtung gekoppelten Recheneinrichtung, wobei das thermodynamische Modell zumindest ein die Gasturbine abbildendes erstes Teilmodell und ein den Innen-Prüfstand abbildendes zweites Teilmodell umfasst, Ermitteln wenigstens eines die Gasturbine im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden ersten Modellwertes anhand des thermodynamischen Modells und Ermitteln wenigstens eines den Innen-Prüfstand während des Betriebs der Gasturbine im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden zweiten Modellwertes anhand des thermodynamischen Modells mittels der Recheneinrichtung und Ermitteln wenigstens eines der Gasturbine zugeordneten ersten Korrekturparameters durch Variieren des thermodynamischen Modells, bis der erste Modellwert innerhalb eines vorbestimmten Toleranzbereichs des ersten Messwertes liegt, und Ermitteln wenigstens eines dem Innen-Prüfstand zugeordneten zweiten Korrekturparameters durch Variieren des thermodynamischen Modells, bis der zweite Modellwert innerhalb eines vorbestimmten Toleranzbereichs des zweiten Messwertes liegt. Mit anderen Worten sieht das erfindungsgemäße Verfahren die Trennung zwischen Zustandsgrößen der Gasturbine und des Innen-Prüfstands vor. Diese Trennung wird möglich durch eine Analyse bzw. gleichzeitige Messung von Zustandsgrößen des Innen-Prüfstands und der im Innen-Prüfstand betriebenen Gasturbine unter weiterer Berücksichtigung eines thermodynamischen Modells, welches sowohl die Gasturbine als auch den Innen-Prüfstand abbildet und entsprechende Modellwerte zu den ermittelten Messwerten liefert. Anschließend wird das thermodynamische Modell an die aktuellen Testbedingungen angepasst, indem das thermodynamische Modell variiert wird, bis die Modellwerte den Messwerten entsprechen bzw. innerhalb vorbestimmter Toleranzbereiche liegen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das thermodynamische Modell den tatsächlichen Testlauf korrekt abbildet, was durch die ersten und zweiten Korrekturparameter ausgedrückt wird. Die ersten und zweiten Korrekturparameter können auch als erste und zweite Skalierer bezeichnet werden und drücken den Unterschied zwischen einer aktuell analysierten

Zustandsgröße und der nominellen Zustandsgröße aus. Skalierer können dabei grundsätzlich ein Verhältnis bzw. einen Faktor oder eine Differenz charakterisieren. Differenzen ausdrückende Skalierer werden im Folgenden auch als Delta-Skalierer (Δ) bezeichnet, während Verhältnisse bzw. Faktoren ausdrückende Skalierer auch als Faktor-Skalierer (C) bezeichnet werden. Da das thermodynamische Modell sowohl ein erstes Teilmodell zur Abbildung des Prüfstands als auch ein zweites Teilmodell zur Abbildung der Gasturbine umfasst, wird hierdurch eine getrennte Beurteilung von Prüfstandsperformance und Performance der Gasturbine ermöglicht. Damit wird die Analyse der Gasturbine genauer, da Einflüsse des Innen-Prüfstands auf die Gasturbinenleistung herausgerechnet werden können. Dass zwischen den Zustandsgrößen des Innen-Prüfstands und der Gasturbine unterschieden werden kann, ist auch dahingehend von Vorteil, dass sich die Zustandsgrößen und Messwerte unterschiedlicher getesteter Gasturbinen teilweise stark unterscheiden. Davon beeinflusst unterscheiden sich naturgemäß auch die Messwerte des Innen-Prüfstands, obwohl dieser ansonsten unverändert ist. Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt es weiterhin, eine Korrelation zwischen dem konkreten Innen-Prüfstand und einem Außen-Prüfstand zu ermitteln, so dass mit Hilfe eines Trendings die Stabilität der Korrelation nachgewiesen werden kann, da die Wechselwirkung zwischen der Gasturbine und dem Innen-Prüfstand aufgelöst wird und ein zuverlässiges Monitoring ermöglicht. Darüber hinaus können mögliche Zustandsänderungen des Innen-Prüfstands, welche eine Auswirkung auf die Ergebnisse des „Pass-off Tests“ oder „Acceptance Tests“ der Gasturbine haben, frühzeitig erkannt und unnötige Maßnahmen an der Gasturbine vermieden werden. Es kann grundsätzlich vorgesehen sein, dass das Verfahren nur in einem ausgewählten Betriebspunkt der Gasturbine durchgeführt wird. Alternativ kann das Verfahren für mehrere oder alle Betriebspunkte der Gasturbine durchgeführt werden.

[0007] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist es vorgesehen, dass der erste und/oder der zweite Korrekturparameter durch eine Analyse-Leistungsrechnung ermittelt wird. Dies ermöglicht eine besonders zuverlässige Anpassung des thermodynamischen Modells. Geeignete Analyse-Leistungsrechnungen („Analysis by Synthesis“) sind dem Fachmann an sich bekannt.

[0008] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist es vorgesehen, dass als erster Korrekturparameter wenigstens ein Skalierer aus der Gruppe $\Delta\eta_{\text{Fan}}$, $\Delta\eta_{\text{LPC}}$, $\Delta\eta_{\text{HPC}}$, $\Delta\eta_{\text{HPT}}$, $\Delta\eta_{\text{LPT}}$, $C\eta_{\text{Fan}}$, $C\eta_{\text{LPC}}$, $C\eta_{\text{HPC}}$, $C\eta_{\text{HPT}}$, $C\eta_{\text{LPT}}$, Δf_{cFan} , Δf_{cLPC} , Δf_{cHPC} , Δf_{cHPT} , Δf_{cLPT} , Cf_{cFan} , Cf_{cLPC} , Cf_{cHPC} , Cf_{cHPT} und Cf_{cLPT} ermittelt wird. Dies erlaubt eine flexible und präzise Berücksichtigung unterschiedlicher Gasturbinen bzw. Gasturbinentypen.

$\Delta\eta$ drückt dabei die Differenz zwischen einem gemessenen und einem berechneten bzw. modellgemäßen Wirkungsgrad η einer bestimmten Gasturbinenkomponente aus, wobei Fan für einen Bläser bzw. ein Gebläse der Gasturbine, LPC für einen Niederdruckverdichter (low pressure compressor), HPC für einen Hochdruckverdichter (high pressure compressor), HPT für eine Hochdruckturbine (high pressure turbine), und LPT für eine Niederdruckturbine (low pressure turbine) stehen. $C\eta$ drückt einen jeweiligen Faktor-Skalierer von einem gemessenen auf einen berechneten Wirkungsgrad einer bestimmten Gasturbinenkomponente aus. Δf_{c} drückt eine Differenz (Delta-Skalierer) zwischen einem gemessenen und einem berechneten Durchsatz f_{c} einer bestimmten Gasturbinenkomponente aus. Cf_{c} drückt einen jeweiligen Faktor-Skalierer von einem gemessenen auf einen berechneten Durchsatz f_{c} einer bestimmten Gasturbinenkomponente aus.

[0009] Weitere Vorteile ergeben sich, indem als zweiter Korrekturparameter wenigstens ein Skalierer aus der Gruppe $\Delta\zeta_{\text{Inlet}}$, $\Delta\zeta_{\text{Exhaust}}$, $C\zeta_{\text{Inlet}}$, $C\zeta_{\text{Exhaust}}$, $\Delta\zeta_{\text{Bellmouth}}$, $C\zeta_{\text{Bellmouth}}$, $w_{\text{leak_TE}}$, $\Delta c_{\text{FG_nozzle}}$, $Cc_{\text{FG_nozzle}}$, $\Delta\text{CD_nozzle}$, Faktor CD_nozzle , $\Delta\text{CD_bellmouth}$ und Faktor CD_bellmouth ermittelt wird. Dies erlaubt eine flexible und präzise Berücksichtigung unterschiedlicher Innen-Prüfstände. $\Delta\zeta_{\text{Inlet}}$ und $\Delta\zeta_{\text{Exhaust}}$ bezeichnen dabei Delta-Skalierer der Druckverluste der Prüfstandskomponenten Einlass (Inlet) bzw. Auslass (Exhaust). $C\zeta_{\text{Inlet}}$ und $C\zeta_{\text{Exhaust}}$ bezeichnen Faktor-Skalierer auf Druckverluste der Prüfstandskomponenten Einlass (Inlet) und Auslass (Exhaust). Grundsätzlich können die Prüfstandskomponenten Inlet und/oder Exhaust in Subkomponenten aufgespalten werden, wodurch beispielsweise mehrere Parameter $\Delta\zeta_{\text{Inlet}_{1..n}}$ mit $n > 1$ für die jeweilige Subkomponente n ermittelt werden können. Entsprechendes gilt für $\Delta\zeta_{\text{Exhaust}}$, $C\zeta_{\text{Inlet}}$ und $C\zeta_{\text{Exhaust}}$. $\Delta\zeta_{\text{Bellmouth}}$ bezeichnet einen Delta-Skalierer des Druckverlusts in einer Einströmdüse (sog. Bellmouth), während $C\zeta_{\text{Bellmouth}}$ dementsprechend einen Faktor-Skalierer von einem gemessenen auf einen errechneten Druckverlust in der Einströmdüse bezeichnet. Der Skalierer $w_{\text{leak_TE}}$ bezeichnet den Leckagemassenstrom, während $\Delta c_{\text{FG_nozzle}}$ und $Cc_{\text{FG_nozzle}}$ den Delta-Skalierer bzw. den Faktor-Skalierer der Schubkoeffizienten einer Ausströmdüse (Triebwerksdüse, Nozzle) des Prüfstands bezeichnen.

[0010] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass als erster Messwert wenigstens ein Parameter aus der Gruppe Gasturbinenmassenstrom, Temperatur im Gaspfad, Druck im Gaspfad, Kraftstoffmassenstrom und Drehzahl mindestens einer Welle in der Gasturbine ermittelt wird. Dies erlaubt eine präzise Messung und Analyse der jeweiligen Gasturbine. Die genannten Parameter können grundsätzlich für eine oder mehre-

re Komponenten einer jeweiligen Gasturbine ermittelt werden. Beispielsweise können die Drehzahlen von zwei oder mehr Wellen, die Temperaturen im Gaspfad an unterschiedlichen Stellen der Gasturbine und/oder die Drücke im Gaspfad an unterschiedlichen Stellen der Gasturbine ermittelt werden. Alternativ oder zusätzlich ist vorgesehen, dass als zweiter Messwert wenigstens ein Parameter aus der Gruppe statischer Druck im Innen-Prüfstand (Testzelle, PS_Cell), Totaldruck im Innen-Prüfstand (Testzelle, PT_Cell) und Strömungsgeschwindigkeit im Innen-Prüfstand (Testzelle, V_Cell) ermittelt wird. Grundsätzlich sind auch Druck- und/oder Geschwindigkeitsmessungen an anderen Stellen im Innen-Prüfstand (z. B. im Detuner/Abgasrohr) denkbar.

[0011] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass mittels der Recheneinrichtung wenigstens ein Referenzmodell von Innen-Prüfstand und/oder Gasturbine unter Referenzbedingungen ermittelt wird. Unter Referenzbedingungen werden im Rahmen der vorliegenden Erfindung die Bedingungen gemäß International Standard Atmosphere (ISA, Normatmosphäre) verstanden, das heißt eine Temperatur von 288,15 K (15 °C) und ein Druck von 1013,25 hPa (= 29,92 inHg) auf Meereshöhe, wobei außer der Standard Atmosphäre noch ein Referenzbetriebspunkt des Triebwerks vorgegeben wird. Dies erlaubt eine vorteilhafte Standardisierung und Vereinheitlichung der Testbedingungen. Das Referenzmodell kann dabei auf dem thermodynamischen Modell basieren.

[0012] Dabei hat es sich als vorteilhaft gezeigt, wenn das thermodynamische Modell beim Ermitteln des Referenzmodells mittels des ersten Korrekturparameters und des zweiten Korrekturparameters angepasst wird. Hierdurch ist es rechnerisch möglich, die Performance des aktuellen Prüfstands und der aktuellen Gasturbine zu ermitteln, die diese unter Referenzbedingungen hätten. Alternativ ist es vorgesehen, das thermodynamische Modell beim Ermitteln des Referenzmodells mittels des ersten Korrekturparameters, aber nicht mittels des zweiten Korrekturparameters anzupassen. Mit anderen Worten wird der dem Innen-Prüfstand zugeordnete Teil der Skalierer auf den nominellen, das heißt auf den ursprünglichen zweiten Modellwert zurückgesetzt. Dies ermöglicht eine Beurteilung, wie die konkret getestete Gasturbine in einem hypothetischen standardisierten Innen-Prüfstand, das heißt unbeeinflusst vom konkret verwendeten Innen-Prüfstand, unter Referenzbedingungen funktionieren würde.

[0013] Alternativ ist es vorgesehen, das thermodynamische Modell beim Ermitteln des Referenzmodells mittels des zweiten Korrekturparameters und nicht mittels des ersten Korrekturparameters anzupassen. Mit anderen Worten wird der der Gasturbine zugeordnete Teil der Skalierer auf den nomi-

nellen, das heißt auf den ursprünglichen ersten Modellwert zurückgesetzt. Dies ermöglicht eine Beurteilung, wie eine hypothetische standardisierte Gasturbine im konkret verwendeten Innen-Prüfstand unter Referenzbedingungen funktionieren würde. Dies bedeutet, dass die Performance des Innen-Prüfstands unbeeinflusst von der konkret verwendeten Gasturbine beurteilt werden kann.

[0014] Weitere Vorteile ergeben sich, wenn die Performance des Innen-Prüfstands unter Referenzbedingungen zur Überwachung der Korrelation des Innen-Prüfstands verwendet wird. Hierzu können beispielsweise aktuelle Testergebnisse mit historischen Testergebnissen verglichen werden, um etwaige Abweichungen zu erkennen. Sollten bei dieser Berechnung Veränderungen gegenüber früheren Ergebnissen auftreten, so sind diese ausschließlich durch den Innen-Prüfstand verursacht.

[0015] Weitere Vorteile ergeben sich, wenn anhand des Referenzmodells eine vom Innen-Prüfstand unabhängige Performance der Gasturbine ermittelt wird. Wenn das Referenzmodell anhand des ersten Messwerts und des zweiten Modellwerts ermittelt wird, können Einflüsse des Innen-Prüfstands auf die Gasturbine herausgerechnet werden, wodurch eine von Einflüssen des Innen-Prüfstands isolierte Beurteilung der Gasturbine ermöglicht ist.

[0016] Ein zweiter Aspekt der Erfindung betrifft eine Recheneinrichtung zur Verwendung in einem Verfahren gemäß dem ersten Erfindungsaspekt. Die erfindungsgemäße Recheneinrichtung ist dabei mit einer Sensoreinrichtung zum Austausch von ersten und zweiten Messwerten koppelbar. Weiterhin ist die erfindungsgemäße Recheneinrichtung ausgebildet, ein thermodynamisches Modell bereitzustellen, wobei das thermodynamische Modell zumindest ein die Gasturbine abbildendes erstes Teilmodell und ein den Innen-Prüfstand abbildendes zweites Teilmodell umfasst. Ebenso ist die erfindungsgemäße Recheneinrichtung dazu ausgebildet, anhand des thermodynamischen Modells wenigstens einen die Gasturbine im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden ersten Modellwert und wenigstens einen den Innen-Prüfstand während des Betriebs der Gasturbine im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden zweiten Modellwert zu ermitteln. Darüber hinaus ist die erfindungsgemäße Recheneinrichtung auch dazu ausgebildet, wenigstens einen der Gasturbine zugeordneten ersten Korrekturparameter zu ermitteln, indem das thermodynamische Modell variiert wird, bis der erste Modellwert innerhalb eines vorbestimmten Toleranzbereichs des ersten Messwerts liegt. Weiterhin ist die erfindungsgemäße Recheneinrichtung dazu ausgebildet, wenigstens einen dem Innen-Prüfstand zugeordneten zweiten Korrekturparameter zu ermitteln, indem das thermodynamische Modell variiert wird, bis der zweite Modellwert innerhalb eines

vorbestimmten Toleranzbereichs des zweiten Messwerts liegt. Die sich hieraus ergebenden Merkmale und deren Vorteile sind den vorstehenden Beschreibungen des ersten Erfindungsaspekts zu entnehmen, wobei vorteilhafte Ausgestaltungen des ersten Erfindungsaspekts als vorteilhafte Ausgestaltungen des zweiten Erfindungsaspekts anzusehen sind. Der Ausdruck „ausgebildet zu“ bezieht sich im Rahmen der vorliegenden Erfindung grundsätzlich auf eine Recheneinrichtung oder sonstige Gegenstände, die nicht nur eine grundlegende Eignung besitzen, sondern durch entsprechende Hard- und/oder Software konkret dazu eingerichtet sind, durch ihren Betrieb die jeweils angegebene Wirkung zu erzielen.

[0017] Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und den Ausführungsbeispielen. Die vorstehend in der Beschreibung genannten Merkmale und Merkmalskombinationen, sowie die nachfolgend in den Ausführungsbeispielen genannten und/oder alleine gezeigten Merkmale und Merkmalskombinationen sind nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen. Es sind somit auch Ausführungen von der Erfindung als umfasst und offenbart anzusehen, die in den Ausführungsbeispielen nicht explizit gezeigt und erläutert sind, jedoch durch separierte Merkmalskombinationen aus den erläuterten Ausführungen hervorgehen und erzeugbar sind. Es sind auch Ausführungen und Merkmalskombinationen als offenbart anzusehen, die somit nicht alle Merkmale eines ursprünglich formulierten unabhängigen Anspruchs aufweisen. Dabei zeigt:

[0018] Fig. 1 eine Prinzipdarstellung eines thermodynamischen Modells, welches sowohl einen Innen-Prüfstand als auch eine im Innen-Prüfstand betriebene Gasturbine abbildet;

[0019] Fig. 2 ein Verfahren zum Ermitteln der Eigenschaften (Zustandsgrößen) des Innen-Prüfstands und einer im Innen-Prüfstand betriebenen Gasturbine; und

[0020] Fig. 3 unterschiedliche Berechnungen unter Referenzbedingungen.

[0021] Fig. 1 zeigt eine Prinzipdarstellung eines thermodynamischen Modells **10**, welches sowohl einen Innen-Prüfstand **12** als auch eine im Innen-Prüfstand **12** betriebene Gasturbine **14** abbildet und durch eine Recheneinrichtung (nicht gezeigt) bereitgestellt wird. Im Gegensatz zu einem Outdoor- bzw. Außen-Prüfstand (nicht gezeigt) gibt es beim Testbetrieb einer Gasturbine **14** im Indoor- bzw. Innen-Prüfstand **12** eine Wechselwirkung zwischen der Triebwerks-Performance und der Prüfstands-Performance. Aus diesem Grund ist es erforderlich, für je-

den Gasturbinen- bzw. Triebwerkstyp eine Korrelation zwischen dem Outdoor-Prüfstand und dem Indoor-Prüfstand **12** durchzuführen. Die Korrelation bildet dabei die Unterschiede zwischen einem konkreten Triebwerkstest im Indoor-Prüfstand **12** und einem hypothetischen Triebwerkstest einem Referenz-Outdoor Prüfstand ab. Um darüber hinaus ein zuverlässiges Trending des Innen-Prüfstands **12** zu gewährleisten, muss zwischen den Eigenschaften bzw.

[0022] Zustandsgrößen des Innen-Prüfstands **12** und der Gasturbine **14** unterschieden werden, da sich die Zustandsgrößen der im Innen-Prüfstand **12** getesteten Gasturbinen **14** normalerweise stark unterscheiden. Davon beeinflusst unterscheiden sich auch die Messwerte des Innen-Prüfstands **12**, obwohl dieser ansonsten unverändert ist. Weiterhin wird durch die Trennung von Prüfstands- und Triebwerksperformance die Triebwerksanalyse genauer, da Einflüsse des Innen-Prüfstands **12** herausgerechnet werden können. Hierdurch können beispielsweise Abweichungen bei einzelnen „Pass-off Tests“ oder „Acceptance Tests“ sowie langfristige Trends eindeutig dem Innen-Prüfstand **12** oder der Gasturbine **14** zugeordnet werden. Dies erlaubt eine besonders zuverlässige Überwachung des Innen-Prüfstands **12** (Test Cell Trend Monitoring), wodurch anlasslose und kostenintensive Rekorrelationen des Innen-Prüfstands **12**, welche ansonsten mindestens alle **7** Jahren durchgeführt werden müssten, vorteilhaft vermieden werden können. Mögliche Zustandsänderungen des Innen-Prüfstands **12**, welche eine Auswirkung auf die Ergebnisse der Pass-off oder Acceptance Tests haben, können stattdessen frühzeitig erkannt und unnötige Maßnahmen am Triebwerk bzw. der Gasturbine **14** vermieden werden.

[0023] Ein wichtiger Aspekt der vorliegenden Erfindung ist daher die Trennung zwischen den Zustandsgrößen der Gasturbine **14** und denen des Innen-Prüfstands **12**. Diese Trennung wird möglich durch eine Analyse der relevanten Zustandsgrößen des Innen-Prüfstands **12** und der Gasturbine **14** unter Berücksichtigung des in Fig. 1 gezeigten thermodynamischen Modell **10**, welches sowohl die Gasturbine **14** in einem ersten Teilmodell als auch den Innen-Prüfstand **12** in einem zweiten Teilmodell abbildet. Der Innen-Prüfstand **12** und damit das zweite Teilmodell setzen sich im gezeigten Ausführungsbeispiel aus den Komponenten Atmosphäre **12a**, Einlass (Inlet) **12b**, Strömungsverzweigung (Branch) **12c**, zwei Strömungskanäle (Duct) **12d**, Einströmdüse (Bellmouth) **12e**, Ausströmdüse (Nozzle) **12f**, Strömungsmischer (Mixer) **12g** und Auslass (Exhaust) **12h** zusammen. Die Gasturbine **14** ist während ihres Betriebs im Innen-Prüfstand **12** zwischen der Einströmdüse (Bellmouth) **12e** und der Ausströmdüse (Nozzle) **12f** sowie unterhalb der beiden Strömungskanäle (Duct) **12d** angeordnet, was sich im Modell **10** entsprechend widerspiegelt. Das erste Teilmodell kann

seinerseits bedarfsweise ebenfalls in zwei oder mehr Subkomponenten aufgeteilt werden.

[0024] Fig. 2 zeigt ein Verfahren zum Ermitteln der Eigenschaften (Zustandsgrößen) des Innen-Prüfstands **12** und der im Innen-Prüfstand **12** betriebenen Gasturbine **14**. Hierzu werden zunächst in Schritt **16a** mittels einer oder mehrerer Sensoreinrichtungen (nicht gezeigt) erste Messwerte ermittelt, welche die Gasturbine **14** im ausgewählten Betriebspunkt charakterisieren. Die ersten Messwerte **16a** können beispielsweise wenigstens einen Parameter aus der Gruppe Temperaturen im Gaspfad (T25, T3, T45, T49, T5, Abgastemperatur (exhaust gas temperature, EGT)), Kraftstoffmassenstrom (Fuel flow, WFE), Triebwerksmassenstrom (W2), Drücke im Gaspfad (P25, P3, P45, P49, P5), Drehzahlen der Wellen im Triebwerk (N1, N2, N3) etc. umfassen.

[0025] Weiterhin werden in Schritt **16b** zweite Messwerte (z. B. Temperaturen, Statischer Druck, PS_{cell_front} ...) ermittelt, welche den Innen-Prüfstand **12** während des Betriebs der Gasturbine **14** im ausgewählten Betriebspunkt charakterisieren. Die Messwerte können beispielsweise einen oder mehrere Parameter aus der Gruppe Statischer Druck in Testzelle bzw. Komponente des Innen-Prüfstands **12** (PS_{Cell}), Totaldruck in Testzelle (PT_{Cell}), Strömungsgeschwindigkeit in Testzelle (V_{Cell}) oder eine Temperatur in der Testzelle umfassen. Grundsätzlich sind auch Druck-, Geschwindigkeits- und/oder Temperaturmessungen an anderen Stellen im Innen-Prüfstand **12** (z.B. im Detuner/Abgasrohr) denkbar. Der Innen-Prüfstand **12** und/oder die Gasturbine **14** werden bedarfsweise mit einer zusätzlichen Instrumentierung bzw. mit entsprechenden Sensoreinrichtungen ausgestattet, um die gewünschten Messwerte zu ermitteln.

[0026] Im folgenden Schritt **18** erfolgt nunmehr die Analyse und Auftrennung der gegenseitigen Einflüsse des Innen-Prüfstands **12** und der Gasturbine **14** mit Hilfe des Modells **10**. Hierzu werden anhand des thermodynamischen Modells **10** entsprechende erste und zweite Modellwerte für die Gasturbine **14** und den Innen-Prüfstand **12** berechnet. Unter Berücksichtigung der ersten und zweiten Messwerte wird das thermodynamische Modell (**10**) anschließend angepasst, bis der erste und der zweite Modellwert dem ersten bzw. zweiten Messwert entspricht oder zumindest innerhalb eines bestimmten Toleranzbereichs liegt. Mit anderen Worten wird das Modell **10** an die tatsächlichen Messergebnisse angepasst, um den konkreten Testlauf korrekt abzubilden. Diese Anpassung wird durch Korrekturparameter bzw. Skalierer ausgedrückt. Hierzu wird im Schritt **20a** wenigstens ein erster Korrekturparameter auf Zustandsgrößen einer Gasturbinenkomponente ermittelt. Der erste Korrekturparameter kann beispielsweise aus der Skalierer-Gruppe $\Delta\eta_{Fan}$, $\Delta\eta_{LPC}$, $\Delta\eta_{HPC}$, $\Delta\eta_{HPT}$,

$\Delta\eta_{LPT}$, $C\eta_{Fan}$, $C\eta_{LPC}$, $C\eta_{HPC}$, $C\eta_{HPT}$, $C\eta_{LPT}$, Δf_{cFan} , Δf_{cLPC} , Δf_{cHPC} , Δf_{cHPT} , Δf_{cLPT} , Cf_{cFan} , Cf_{cLPC} , Cf_{cHPC} , Cf_{cHPT} und Cf_{cLPT} ausgewählt werden.

[0027] Im Schritt **20b** wird analog wenigstens ein zweiter Korrekturparameter bzw. Skalierer auf Zustandsgrößen des Innen-Prüfstands **12** ermittelt. Der oder die zweiten Korrekturparameter können beispielsweise aus der Skalierer-Gruppe $\Delta\zeta_{Inlet}$, $\Delta\zeta_{Exhaust}$, $C\zeta_{Inlet}$, $C\zeta_{Exhaust}$, $\Delta\zeta_{Bellmouth}$, $C\zeta_{Bellmouth}$, w_{leak_TE} , Δc_{FG_nozzle} und Cc_{FG_nozzle} ausgewählt werden.

[0028] Anschließend werden drei verschiedene Berechnungen bei Referenzbedingungen (ISA) durchgeführt. Dabei wird wahlweise mit aktuell analysierten bzw. durch die entsprechenden Korrekturparameter korrigierten oder nominellen Zustandsgrößen, bei denen die betreffenden Skalierer auf die nominellen Werte des Modells **10** zurückgesetzt und nicht an die konkreten Messwerte angepasst sind, von Innen-Prüfstand **12** und Gasturbine **14** gerechnet. Fig. 3 zeigt exemplarisch verschiedene, mit ISA1, ISA2 und ISA3 bezeichnete Referenzmodelle unter ISA-Bedingungen. Die Variante „ISA1“ umfasst dabei die Verwendung der aktuell analysierten Referenzwerte, das heißt der über die Skalierer auf die konkreten Testbedingungen angepassten und auf ISA-Bedingungen normierten ersten Modellwerte des Innen-Prüfstands **12** sowie der aktuell analysierten Referenzwerte der Gasturbine **14**, wodurch diejenige Performance **22** des konkreten Innen-Prüfstands **12** und der konkreten Gasturbine **14** beurteilt werden kann, die diese unter Referenzbedingungen hätten.

[0029] Die Berechnungsvariante „ISA2“ umfasst die Verwendung der analysierten und normierten Referenzwerte des Innen-Prüfstands **12** sowie der nominalen Werte der Gasturbine, die mit **14'** bezeichnet werden, wodurch die von der konkreten Gasturbine **14** unbeeinflusste Performance **22'** des Innen-Prüfstands **12** unter ISA-Bedingungen beurteilt werden kann. Für das Monitoring des Innen-Prüfstands **12** ist dabei diese Berechnung mit einer nominalen Gasturbine **14**, das heißt mit einem hypothetischen Standardtriebwerk, und dem konkreten Innen-Prüfstand **12** relevant. Diese Berechnung spiegelt mit anderen Worten einen Triebwerkstest mit einem immer gleichen Triebwerk **14** bei immer gleichen, standardisierten Umgebungsbedingungen wieder. Sollten hier Veränderungen auftreten, so sind diese lediglich durch den Innen-Prüfstand **12** verursacht.

[0030] Die Berechnungsvariante „ISA3“ umfasst die Verwendung der nominalen Referenzwerte des Innen-Prüfstands **12'** und der analysierten Referenzwerte der Gasturbine **14**, wodurch die vom konkreten Innen-Prüfstand **12** unbeeinflusste Performance **22''** der Gasturbine **14** unter ISA Bedingungen beur-

teilt werden kann. Dies erlaubt ein besonders präzises Monitoring der Qualität (Leistung) der getesteten Gasturbine **14**, da Einflüsse des Innen-Prüfstands **12** und der aktuellen Umgebungsbedingungen auf das Triebwerk **14** herausgerechnet werden.

Bezugszeichenliste

10	Modell
12	Indoor-Prüfstand
12a	Atmosphäre
12b	Inlet
12c	Branch
12d	Duct
12e	Bellmouth
12f	Nozzle
12g	Mixer
12h	Exhaust
14	Gasturbine
16a	Schritt
16b	Schritt
18	Schritt
20a	Schritt
20b	Schritt

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln eines Einflusses eines Innen-Prüfstands (**12**) auf eine im Innen-Prüfstand (**12**) betriebene Gasturbine (**14**), insbesondere eines Flugtriebwerks, folgende Schritte umfassend:

- Anordnen der Gasturbine (**14**) im Innen-Prüfstand (**12**);
- Betreiben der Gasturbine (**14**) im Innen-Prüfstand (**12**) bei wenigstens einem ausgewählten Betriebspunkt der Gasturbine (**14**);
- Ermitteln wenigstens eines die Gasturbine (**14**) im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden ersten Messwertes und wenigstens eines den Innen-Prüfstand (**12**) während des Betriebs der Gasturbine (**14**) im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden zweiten Messwertes mittels wenigstens einer Sensoreinrichtung;
- Bereitstellen eines thermodynamischen Modells (**10**) mittels einer mit der Sensoreinrichtung gekoppelten Recheneinrichtung, wobei das thermodynamische Modell zumindest ein die Gasturbine (**14**) abbildendes erstes Teilmodell und ein den Innen-Prüfstand (**12**) abbildendes zweiten Teilmodell umfasst;
- Ermitteln wenigstens eines die Gasturbine (**14**) im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden ersten Modellwertes anhand des thermodynamischen Modells und Ermitteln wenigstens eines den Innen-Prüfstand (**12**) während des Betriebs der Gasturbine (**14**) im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden zweiten Modellwertes anhand des thermodynamischen Modells mittels der Recheneinrichtung; und
- Ermitteln wenigstens eines der Gasturbine (**14**) zugeordneten ersten Korrekturparameters durch Vari-

ieren des thermodynamischen Modells, bis der erste Modellwert innerhalb eines vorbestimmten Toleranzbereichs des ersten Messwerts liegt, und Ermitteln wenigstens eines dem Innen-Prüfstand (**12**) zugeordneten zweiten Korrekturparameters durch Variieren des thermodynamischen Modells, bis der zweite Modellwert innerhalb eines vorbestimmten Toleranzbereichs des zweiten Messwerts liegt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste und/oder der zweite Korrekturparameter durch eine Analyse-Leistungsrechnung ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass als erster Korrekturparameter wenigstens ein Skalierer aus der Gruppe $\Delta\eta_{\text{Fan}}$, $\Delta\eta_{\text{LPC}}$, $\Delta\eta_{\text{HPC}}$, $\Delta\eta_{\text{HPT}}$, $\Delta\eta_{\text{LPT}}$, $C_{\eta_{\text{Fan}}}$, $C_{\eta_{\text{LPC}}}$, $C_{\eta_{\text{HPC}}}$, $C_{\eta_{\text{HPT}}}$, $C_{\eta_{\text{LPT}}}$, Δf_{cFan} , Δf_{cLPC} , Δf_{cHPC} , Δf_{cHPT} , Δf_{cLPT} , C_{fcFan} , C_{fcLPC} , C_{fcHPC} , C_{fcHPT} und C_{fcLPT} ermittelt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass als zweiter Korrekturparameter wenigstens ein Skalierer aus der Gruppe $\Delta\zeta_{\text{Inlet}}$, $\Delta\zeta_{\text{Exhaust}}$, $C_{\zeta_{\text{Inlet}}}$, $C_{\zeta_{\text{Exhaust}}}$, $\Delta\zeta_{\text{Bellmouth}}$, $C_{\zeta_{\text{Bellmouth}}}$, $w_{\text{leak_TE}}$, $\Delta c_{\text{FG_nozzle}}$ und $C_{\text{cFG_nozzle}}$ ermittelt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass als erster Messwert wenigstens ein Parameter aus der Gruppe Gasturbinenmassenstrom, Temperatur im Gaspfad, Druck im Gaspfad, Kraftstoffmassenstrom und Drehzahl mindestens einer Welle in der Gasturbine ermittelt wird und/oder dass als zweiter Messwert wenigstens ein Parameter aus der Gruppe statischer Druck im Innen-Prüfstand, Totaldruck im Innen-Prüfstand und Strömungsgeschwindigkeit im Innen-Prüfstand ermittelt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels der Recheneinrichtung wenigstens ein Referenzmodell (ISA1, ISA2, ISA3) von Innen-Prüfstand (**12**) und/oder Gasturbine (**14**) unter Referenzbedingungen (ISA) ermittelt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass das thermodynamische Modell beim Ermitteln des Referenzmodells (ISA1, ISA2, ISA3):

- mittels des ersten Korrekturparameters und des zweiten Korrekturparameters angepasst wird; oder
- mittels des ersten Korrekturparameters und nicht mittels des zweiten Korrekturparameters angepasst wird; oder
- mittels des zweiten Korrekturparameters und nicht mittels des ersten Korrekturparameters angepasst wird.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Performance (22') des Innen-Prüfstands (12) anhand des Referenzmodells (ISA2) zur Überwachung der Korrelation des Innen-Prüfstands (12) verwendet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass anhand des Referenzmodells (ISA3) eine vom Innen-Prüfstand (12) unabhängige Performance (22'') der Gasturbine (14) ermittelt wird.

10. Recheneinrichtung zur Verwendung in einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass

diese:

- mit wenigstens einer Sensoreinrichtung zum Austausch von ersten und zweiten Messwerten koppelbar ist;
- ausgebildet ist, ein thermodynamisches Modell (10) bereitzustellen, wobei das thermodynamische Modell zumindest ein die Gasturbine (14) abbildendes erstes Teilmodell und ein den Innen-Prüfstand (12) abbildendes zweites Teilmodell umfasst;
- ausgebildet ist, anhand des thermodynamischen Modells (10) wenigstens einen die Gasturbine (14) im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden ersten Modellwert und wenigstens einen den Innen-Prüfstand (12) während des Betriebs der Gasturbine (14) im ausgewählten Betriebspunkt charakterisierenden zweiten Modellwert zu ermitteln;
- ausgebildet ist, wenigstens einen der Gasturbine (14) zugeordneten ersten Korrekturparameter zu ermitteln, indem das thermodynamische Modell variiert wird, bis der erste Modellwert innerhalb eines vorbestimmten Toleranzbereichs des ersten Messwerts liegt; und
- ausgebildet ist, wenigstens einen dem Innen-Prüfstand (12) zugeordneten zweiten Korrekturparameter zu ermitteln, indem das thermodynamische Modell variiert wird, bis der zweite Modellwert innerhalb eines vorbestimmten Toleranzbereichs des zweiten Messwerts liegt.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

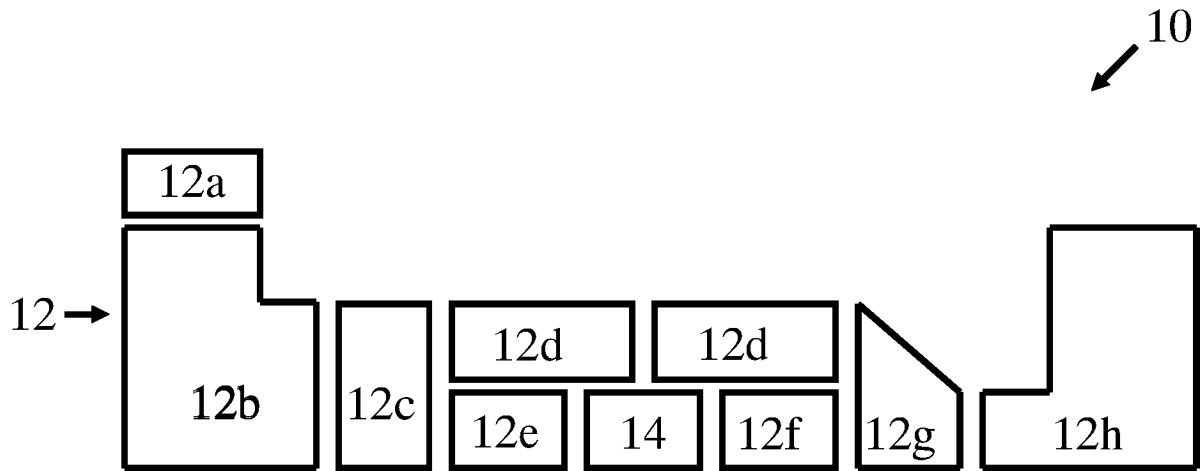


Fig. 1

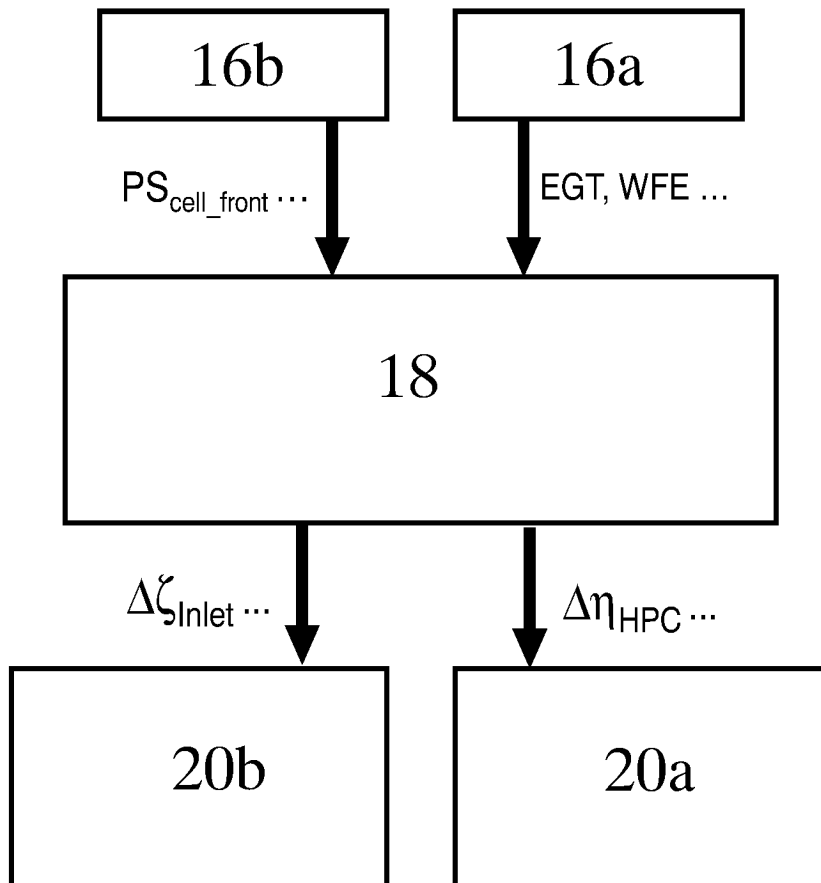


Fig. 2

ISA 1	ISA 2	ISA 3
12	12	12'
+	+	+
14	14'	14
=	=	=
22	22'	22''

Fig. 3