

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
22. Mai 2020 (22.05.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/099389 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G05B 17/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/080998

(22) Internationales Anmeldedatum:
12. November 2019 (12.11.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2018 128 356.3
13. November 2018 (13.11.2018) DE

(71) Anmelder: LUFTHANSA TECHNIK AG [DE/DE]; Weg beim Jäger 193, 22335 Hamburg (DE).

(72) Erfinder: PFINGSTEN, Kai-Christoph; Geschwister-Scholl-Straße 18, 20251 Hamburg (DE). HEIGL,

Robert; Engelhardstraße 53, 63450 Hanau (DE). RONS DORF, Olaf; Sandwiese 29, 65812 Bad Soden (DE). DÖRWALD, Lennart; Uhlenhorster Weg 12, 22085 Hamburg (DE). ENKELMANN, Franz; Schwanheimer Straße 152, 60528 Frankfurt (DE).

(74) Anwalt: GLAWE DELFS MOLL PARTNERSCHAFT MBB VON PATENT- UND RECHTSANWÄLTEN; Postfach 13 03 91, 20148 Hamburg (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,

(54) Title: METHOD FOR ASSESSING THE FUEL EFFICIENCY OF AIRCRAFT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR BEWERTUNG DER TREIBSTOFFEFFIZIENZ VON LUFTFAHRZEUGEN

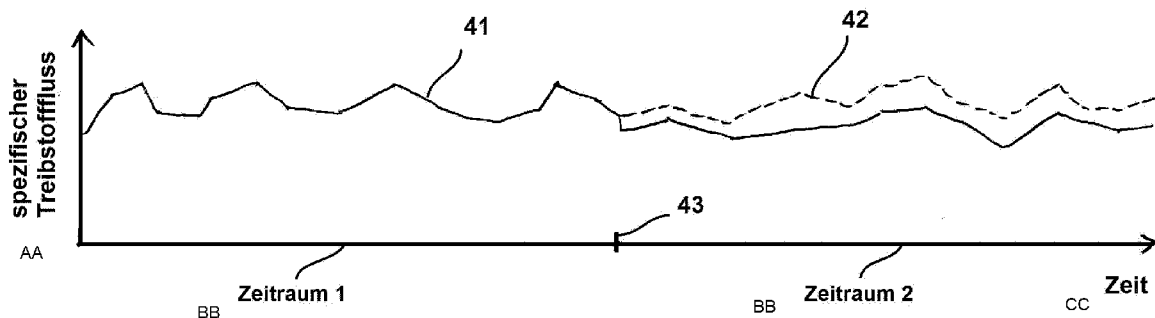


Fig. 4

AA Flux de carburant spécifique
BB Intervale de temps
CC Temps

(57) Abstract: The invention relates to a method for assessing the fuel efficiency of aircraft, characterised by the following steps: a. establishing a simulation model for calculating fuel consumption during the flight operation on the basis of a physical model of the flight operation, the simulation model comprising physical constants, physical variables and adjustable physical parameters; b. measuring the physical variables during the flight operation, the physical variables comprising the actual fuel consumption; c. performing an optimisation calculation for the purposes of adjusting the adjustable physical parameters such that fuel consumption calculated using the simulation model and fuel consumption actually measured during the flight operation substantially match. The invention further relates to a method for predicting the influence of a modification to an aircraft on its fuel efficiency, to a method for determining the change in the fuel efficiency of an aircraft between a first point in time or period of time and a second point in time or period of time, and to a method for comparing the fuel efficiency of at least two aircraft, these additional methods making use of the method according to the invention for assessing the fuel efficiency of aircraft. The invention also relates to a corresponding computer program product. The methods according to the invention enable fuel efficiency to be assessed much more accurately with a high temporal resolution.

WO 2020/099389 A1

NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- hinsichtlich der Identität des Erfinders (Regel 4.17 Ziffer i)
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)
- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(57) Zusammenfassung: Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen, gekennzeichnet durch folgende Schritte: a. Aufstellen eines Simulationsmodells zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs im Flugbetrieb auf Basis eines physikalischen Modells des Flugbetriebs, wobei das Simulationsmodell physikalische Konstanten, physikalische Messgrößen und anpassbare physikalische Parameter umfasst; b. Messung der physikalischen Messgrößen im Flugbetrieb, wobei die physikalischen Messgrößen den tatsächlichen Treibstoffverbrauch umfassen; c. Durchführen einer Optimierungsrechnung zur Anpassung der anpassbaren physikalischen Parameter dergestalt, dass gemäß dem Simulationsmodell berechneter und tatsächlich gemessener Treibstoffverbrauch im Flugbetrieb im Wesentlichen übereinstimmen. Gegenstand der Erfindung ist zudem ein Verfahren zur Prädiktion des Einflusses einer Modifikation eines Luftfahrzeugs auf dessen Treibstoffeffizienz, ein Verfahren zur Ermittlung der Veränderung der Treibstoffeffizienz eines Luftfahrzeugs zwischen einem ersten Zeitpunkt oder Zeitraum und einem zweiten Zeitpunkt oder Zeitraum sowie ein Verfahren zum Vergleich der Treibstoffeffizienz von wenigstens zwei Luftfahrzeugen, wobei diese weiteren Verfahren vom erfindungsgemäßen Verfahren zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen Gebrauch machen. Gegenstand der Erfindung ist auch ein entsprechendes Computerprogrammprodukt. Durch die erfindungsgemäßen Verfahren sind äußerst genauere Bewertungen der Treibstoffeffizienz mit hoher zeitlicher Auflösung möglich.

Verfahren zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen.

Aus wirtschaftlichen Gründen sowie zur Schonung der Umwelt sind Betreiber von Luftfahrzeugen ständig darum bemüht, die Effizienz der Luftfahrzeuge zu verbessern. Ein wesentlicher Faktor beim Betrieb von Luftfahrzeugen ist der Treibstoffverbrauch. Eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs ist auch immer mit der Verbesserung der Effizienz des Luftfahrzeugs verbunden. Möglichkeiten zur Reduzierung des Treibstoffverbrauchs können zum Beispiel durch treibstoffeinsparende technische Maßnahmen wie z. B. Nachbesserungen (sogenannten Retrofits) oder Wartungsmaßnahmen am Luftfahrzeug erreicht werden. Ein Beispiel einer solchen Maßnahme ist das Anbringen von sogenannten Winglets an den Enden der Tragflächen, welches aerodynamische Vorteile mit sich bringt und somit geeignet ist, die Treibstoffeffizienz zu erhöhen.

Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, durchgeführte Effizienzmaßnahmen zu überprüfen, indem der tatsächliche Treibstoffverbrauch bestimmt und daraus ggf. unter Berücksichtigung weiterer Messgrößen (z.B. die Zuladung des Luftfahrzeugs oder die herrschenden Windverhältnisse) in regelmäßigen Zeitabständen mit Hilfe einer empirisch ermittelten Formel ein Kennwert errechnet wird (beispielsweise eine spezifische Reichweite), welcher eine Aussage über die Treibstoffeffizienz erlaubt. Es hat sich allerdings gezeigt, dass dieses Verfahren in vielen Fällen nicht die gewünschte Genauigkeit liefert, um die Effizienzmaßnahme beurteilen zu können.

Ausgehend davon liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bewertung der Treibstoffeffizienz eines Luftfahrzeugs sowie ein entsprechendes Computerprogrammprodukt bereitzustellen, mit dessen Hilfe im Vergleich zu vorbekannten Verfahren genauere Ergebnisse erzielt werden können.

Gelöst wird die Aufgabe durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1, ein Verfahren gemäß einem der nebengeordneten Ansprüche 10, 11 und 12 sowie durch ein Computerprogrammprodukt gemäß Anspruch 13. Vorteilhafte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen umfasst die nachfolgenden Schritte:

- a. Aufstellen eines Simulationsmodells zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs im Flugbetrieb auf Basis eines physikalischen Modells des Flugbetriebs, wobei das Simulationsmodell physikalische Konstanten, physikalische Messgrößen und anpassbare physikalische Parameter umfasst,
- b. Messung der physikalischen Messgrößen im Flugbetrieb, wobei die physikalischen Messgrößen den tatsächlichen Treibstoffverbrauch umfassen,
- c. Durchführen einer Optimierungsrechnung zur Anpassung der anpassbaren physikalischen Parameter dergestalt, dass gemäß dem Simulationsmodell berechneter und tatsächlich gemessener Treibstoffverbrauch im Flugbetrieb im Wesentlichen übereinstimmen.

Zunächst werden einige im Rahmen der Erfindung verwendete Begriffe erläutert. Das erfindungsgemäße Simulationsmodell basiert auf einem physikalischen Modell des Flugbetriebs. Ein physikalisches Modell des Flugbetriebs bezeichnet im Rahmen der Erfindung ein Modell, durch das der Flugbetrieb mathematisch auf quantitative Weise nachgebildet wird. Das physikalische Modell kann beispielsweise ein Gleichungssystem umfassen, durch das auf analytische und/oder numerische Weise der Flugbetrieb quantitativ beschrieben bzw. nachgebildet wird. Das physikalische Modell kann insbesondere auf dem Energieerhaltungssatz basieren, wobei eine dem Treibstoffverbrauch zuzuordnende Energiemenge verglichen oder gleichgesetzt wird mit der (gemäß dem physikalischen Modell) für die Aufrechterhaltung des Flugbetriebs erforderlichen Energiemenge. Dazu kann das physikalische Modell eines oder mehrere Teilmodelle umfassen ausgewählt aus der Gruppe: thermodynamisches Triebwerksmodell, kinematisches Modell der Flugphysik, strömungsphysikalisches Modell der Aerodynamik und Modell der Systemtechnik. Mit Hilfe dieser Teilmodelle können die thermodynamischen, flugdynamischen und aerodynamischen Zusammenhänge sowie die von systemseitigen Leistungsabnehmern verbrauchte Energie berücksichtigt werden. Insbesondere kann im Rahmen der Erfindung der durch die Verbrennung der gemessenen Treibstoffmenge erzeugte Triebwerksschub anhand des thermodynamischen Triebwerksmodells berechnet werden und verglichen werden mit dem Schub, welcher theoretisch notwendig ist, um den Flugbetrieb nach flugdynamischen und aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten aufrecht zu erhalten.

In das physikalische Modell fließen physikalische Konstanten, physikalische Messgrößen und anpassbare physikalische Parameter ein.

Physikalische Konstanten bezeichnen von der Natur vorgegebene Größen, welche für den Flugbetrieb relevant sind. Beispielsweise stellen die Erdbeschleunigung, die spezifische Gaskonstante oder die spezifische Energiedichte des verwendeten Treibstoffs physikalische Konstanten im Sinne der Erfindung dar, welche in das physikalische Modell einfließen können.

Physikalische Messgrößen bezeichnen im Rahmen der Erfindung solche Messgrößen, die im Rahmen des Verfahrensschritts b. gemessen werden und die zum Zeitpunkt der Messung durch den gegenwärtigen Flugzustand festgelegt sind. Physikalische Messgrößen können insbesondere unmittelbar mit Hilfe entsprechender Sensoren gemessen werden oder mittelbar aus gemessenen oder auf andere Weise verfügbaren den Flugzustand charakterisierenden Daten abgeleitet werden.

Anpassbare physikalische Parameter stellen im Rahmen der Erfindung solche Größen dar, welche innerhalb des physikalischen Modells zur mathematischen Nachbildung bzw. Beschreibung des Flugbetriebs erforderlich sind und welche im Rahmen der Simulation angepasst (also verändert) werden, so dass der errechnete Treibstoffverbrauch mit dem gemessenen Treibstoffverbrauch im Wesentlichen übereinstimmt. Bei den physikalischen Parametern kann es sich insbesondere um solche Größen handeln, welche keiner direkten Messung zugänglich sind. Anpassbare physikalische Parameterwerte können beispielsweise ausgewählt sein aus der Gruppe: Null-Auftriebsbeiwert, vom Anstellwinkel abhängiges Derivat, Null-Widerstandsbeiwert, Koeffizienten für den linearen Anteil eines induzierten Widerstands, Koeffizienten für den quadratischen Anteil des induzierten Widerstands, Druckverlust in der Brennkammer.

Im Rahmen der Erfindung wurde erkannt, dass es mit Hilfe des erfindungsgemäßen den Flugbetrieb beschreibenden physikalischen Modells möglich ist, eine deutlich verbesserte Beurteilung der Treibstoffeffizienz zu erzielen. Insbesondere wurde erkannt, dass die im Flugbetrieb ablaufenden physikalischen Vorgänge grundsätzlich mathematisch beschreibbar sind und in ein umfassendes physikalisches Modell des Flugbetriebs aufgenommen werden können. Aus diesem Modell können physikalische Parameter ermittelt werden, aus denen die Treibstoffeffizienz mit hoher Genauigkeit bestimmbar ist. Insbesondere ist die erzielbare Genauigkeit deutlich höher als bei bekannten Verfahren, in denen lediglich vereinzelte Messwerte in eine empirische Formel eingesetzt werden, um beispielsweise eine spezifische Reichweite zu berechnen, ohne dass eine Anpassung physikalischer Parameter an ein umfassendes physikalisches Modell stattfindet.

Anders als bei sogenannten „machine learning“-Verfahren wird das physikalische Modell des Flugbetriebs im Rahmen der Erfindung während der Simulation, also während des Vorgangs der Anpassung der anpassbaren Parameter, nicht verändert. Vielmehr kann das physikalische Modell auf bekannten physikalischen Zusammenhängen basieren oder daraus abgeleitet sein und insoweit während der erfindungsgemäßen Durchführung des Verfahrens festgelegt sein. Natürlich schließt dies nicht aus, dass das physikalische Modell vor bzw. nach seiner Durchführung angepasst bzw. verbessert wird. Wenn ein feststehendes Modell verwendet wird, können die ermittelten Parameter an zwei Zeitpunkten oder für verschiedene Flugzeuge unmittelbar miteinander verglichen werden, was bei der Verwendung von sogenannten „machine learning“-Algorithmen im Allgemeinen nicht möglich ist.

In einer bevorzugten Ausführungsform werden den anpassbaren Parametern vor Beginn der Optimierungsrechnung physikalisch sinnvolle Startwerte und/oder Wertebereiche zugeordnet, die sich an Literaturbereiche anlehnen oder basierend auf Erfahrungswerten festgelegt wurden. Innerhalb dieser Wertebereiche erfolgt im Rahmen der Optimierungsrechnung die Ermittlung der anpassbaren Parameter. Der Rechenaufwand zur Ermittlung der anpassbaren physikalischen Parameter kann dadurch reduziert werden.

Das Simulationsmodell ist, wie oben bereits erläutert, vorzugsweise so ausgebildet, dass es Teilmodelle umfasst, welche ausgewählt sind aus der Gruppe: thermodynamisches Triebwerksmodell, kinematisches Modell der Flugphysik, strömungsphysikalisches Modell der Aerodynamik, Modell der Systemtechnik. Ein thermodynamisches Triebwerksmodell bezeichnet dabei ein physikalisches Modell, durch das für ein gegebenes Triebwerk insbesondere das Verhältnis zwischen eingesetztem Treibstoff und erzeugtem Schub quantitativ beschrieben wird. Im Rahmen eines kinematischen Modells der Flugphysik sowie eines strömungsphysikalischen Modells der Aerodynamik werden die kinematischen und aerodynamischen Zusammenhänge, welche den Auf- und Vortrieb eines in der Luft befindlichen Flugzeuges bestimmen, auf quantitative Weise beschrieben. Schließlich bezeichnet ein Modell der Systemtechnik ein physikalisches Modell, durch das insbesondere die im Flugzeug vorhandenen Leistungsabnehmer sowie ggf. deren Rückwirkung auf den Flugbetrieb erfasst und quantitativ beschrieben werden. Das Flugzeug kann insoweit als Gesamtsystem betrachtet und physikalisch modelliert werden. Systembetrachtungen von Komponenten als Teil des Gesamtsystems werden vorzugsweise in die Gesamtsystemebene überführt und in diese integriert.

Die Auswahl der physikalischen Messgrößen erfolgt vorzugsweise aus zumindest einer der nachfolgenden Gruppen: thermodynamische Messgrößen, kinematische Messgrößen, aerodynamische Messgrößen, systemtechnische Messgrößen und Identifikationskenngrößen.

Thermodynamische Messgrößen können im Rahmen der Erfindung beispielsweise ausgewählt sein aus der Gruppe: Treibstoffdurchfluss eines Triebwerks, Treibstoffdurchfluss gesamt, Abgastemperatur der Triebwerke, Luftmassendurchsatz des Air-Conditioning Packs, Auslasstemperatur der Bleed Air aus dem Precooler Triebwerk, Drehzahl des Triebwerks, maximale Drehzahl der Triebwerke, kommandierte Drehzahl der Triebwerke, totaler Treibstoffdruck an der Einspritzdüse, bisher verbrauchter Treibstoff, Treibstofftemperatur der Triebwerke, Generatorlast der Triebwerke.

Kinematische Messgrößen können beispielsweise ausgewählt sein aus der Gruppe: Gesamtgewicht des Flugzeugs, Treibstoffmasse im jeweiligen Tank des Flugzeug, Beschleunigung in longitudinaler Richtung, Beschleunigung in lateraler Richtung, Beschleunigung in vertikaler Richtung, Winkel der Bewegung um die Längsachse (Hängewinkel), Winkel der Bewegung um die Querachse (Nickwinkel), Winkel der Bewegung um die Hochachse / Flugrichtung (Gierwinkel), Anstellwinkel, Schiebewinkel, Drehgeschwindigkeit um die Längsachse (Rollrate), Drehgeschwindigkeit um die Querachse (Nickrate), Drehgeschwindigkeit um die Hochachse (Gierrate), Schwerpunktlage des Flugzeugs, Flugzeugposition auf dem Längengrad, Flugzeugposition auf dem Breitengrad, Flughöhe, Beschleunigung in Flugrichtung, Steigrate, Winkel zwischen Flugzeuggeschwindigkeitsvektor und Horizontale, Winkel zwischen Weg über Grund und Orientierung, tatsächliche Geschwindigkeit in umgebender Luft, kalibrierte /

korrigierte Geschwindigkeit in umgebender Luft, Geschwindigkeit des Wind aus Längsrichtung, Geschwindigkeit des Windes aus Hochrichtung, Geschwindigkeit des Windes aus Querrichtung, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Geschwindigkeit über Grund.

Aerodynamische Messgrößen können ausgewählt sein aus der Gruppe: statische Temperatur der umgebenden Luft, statischer Druck der umgebenden Luft, Totaltemperatur der umgebenden Luft, totaler Luftdruck, dynamischer Luftdruck, totaler Luftdruck an bestimmten Flugzeugpositionen, totale Lufttemperatur an bestimmten Flugzeugpositionen, Position des Höhenleitwerks, Trimmung des Höhenleitwerks, Trimmung des Seitenruders, Ausschlag des Seitenleitwerks, Ausschlag der Höhenruder links und rechts, ggf. Flaps und Slats, Ausschlag des linken Querruders, Ausschlag des rechten Querruders, Ausschlag des Spoiles links, Ausschlag des Spoiles rechts, Machzahl.

Systemtechnische Messgrößen können ausgewählt sein aus der Gruppe: Leistungsabnahme der Bordelektronik, Leistungsabgabe von an Bord befindlichen Energiespeichern (z.B. Batterien), Leistungsabgabe an hydraulische und/oder pneumatische Systeme, Packflow, Precooler Exit Temperature.

Identifikationskenngrößen können ausgewählt sein aus der Gruppe: Seriennummer der Triebwerke, Flugdatum, Flugzeugidentifikationsnummer, Abflug-/Ankunftszeiten, Flughafenidentifikationsnummer, Identifikationsgrößen für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen, Identifikationsgrößen für vorgenommene Retrofitmaßnahmen.

Natürlich können einzelne oder mehrere der Messgrößen auch einer Mehrzahl von Teilmodellen zugeordnet sein und im Rahmen von verschiedenen Teilmodellen verwendet werden.

Vorzugsweise werden im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens solche physikalischen Messgrößen verwendet, welche in einer vorausgegangenen Sensitivitätsstudie einen hinreichend hohen Einfluss auf den Treibstoffverbrauch gezeigt haben. Insbesondere können solche physikalischen Messgrößen verwendet werden, welche ohnehin bereits in bestehenden Flugzeugen erfasst werden. Beispielsweise können Flugdaten aus einem Quick Access Recorder (QAR-Daten) als physikalische Messgrößen verwendet werden.

In einer bevorzugten Ausführungsform ist vorgesehen, dass die Messung des tatsächlichen Treibstoffverbrauchs und der physikalischen Messgrößen im Flugbetrieb über einen definierten Zeitraum während eines definierten Reiseflugereignisses durchgeführt wird, wobei die Definition des Reiseflugereignisses vorzugsweise geographische Daten und/oder Wetterdaten und/oder atmosphärische Daten umfasst. Dieser Ausgestaltung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass statistische Schwankungen des Treibstoffverbrauchs während eines definierten Reiseflugereignisses deutlich reduziert sind. Ein solches Reiseflugereignis kann beispielsweise durch das Erreichen einer definierten Reiseflughöhe bei bevorzugt stabilem Geradeausflug und/oder bei Vorherrschen von beispielsweise konstanter Temperatur und/oder konstanten Windverhältnissen und/oder konstanten sonstigen atmosphärischen Bedingungen gegeben sein. Die Definition eines Reiseflugereignisses erfolgt vorzugsweise anhand der Festlegung von Toleranzbereichen von einzelnen oder von einer Mehrzahl von ausgewählten physikalischen Messgrößen. Beispielsweise kann der einzelnen oder der Mehrzahl von ausgewählten physikalischen Messgrößen ein Zielwert sowie ein Toleranzbereich zugeordnet werden. Sofern die Messgröße bzw. die Mehrzahl von Messgrößen für einen vorgegebenen Zeitraum den Toleranzbereich nicht verlässt, kann dieser Zeitraum als Reise-

flugereignis aufgefasst werden. Aufgrund der geringeren statistischen Schwankungen können die für die Beurteilung der Treibstoffeffizienz relevanten anpassbaren Parameter mit deutlich höherer Präzision ermittelt werden.

Eine bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die Messung des tatsächlichen Treibstoffverbrauchs und der physikalischen Messgrößen über eine Mehrzahl von Reiseflugereignissen erfolgt und vorzugsweise eine Mittelung der Messergebnisse vorgenommen wird. Indem mehrere Reiseflugereignisse betrachtet werden und vorzugsweise eine Mittelung stattfindet, kann der für die Simulation erforderliche Rechenaufwand gegenüber dem für eine vollständige Betrachtung der Flugdaten (beispielsweise der sekundlich gegebenen Fullflight-Flugdaten) erforderlichen Rechenaufwand weiter verringert werden, wobei die Genauigkeit nicht oder nur unwesentlich beeinträchtigt wird. Durch geeignete Definition der ein Reiseflugereignis festlegenden Bedingungen kann die Anzahl der unter die Definition des Reiseflugereignisses fallenden Ereignisse angepasst werden. Es wurde im Rahmen der Erfindung erkannt, dass die Simulationsgüte sich bei geeigneter Definition der Reiseflugereignisse sogar verbessern kann. Durch zu eng definierte Filterkriterien zur Festlegung der Reiseflugereignisse kann es hingegen vorkommen, dass zu wenig Daten aggregiert werden und sich die Simulationsgüte verschlechtert. Bevorzugt ist vorgesehen, dass ein Optimum auf Basis von Fullflight-Daten ermittelt wird.

Die Anpassung der anpassbaren physikalischen Parameter mit Hilfe der Optimierungsrechnung wird bevorzugt unter Verwendung eines Fittingalgorithmus durchgeführt, wobei als Optimierungsrechnung vorzugsweise metaheuristische Optimierungsmethoden wie z. B. ein genetischer Algorithmus genutzt werden. Hintergrund der Verwendung metaheuristischer Optimierungsmethoden

ist, dass das physikalische Modell des Flugbetriebs unter Umständen äußerst komplex ist und das Auffinden von Lösungen nicht auf einfache Weise möglich ist.

Nachdem die anpassbaren Parameter ermittelt wurden, können basierend auf dem physikalischen Modell und den ermittelten anpassbaren Parametern Kennzahlen wie beispielsweise ein Wirkungsgrad oder eine spezifische Reichweite zur Bewertung der Treibstoffeffizienz eines Luftfahrzeugs ermittelt werden. Die Betrachtung der eigens gebildeten Kennzahlen über einen zeitlichen Verlauf, insbesondere vor und nach der Vornahme einer Maßnahmen zur Verbesserung der Treibstoffeffizienz, kann Auskunft über den Einfluss der Maßnahmen geben. Insbesondere ist es möglich, beispielsweise jedes Reiseflugereignis eines Flugzeuges mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens zu analysieren. Es kann dadurch die Treibstoffeffizienz mit hoher zeitlicher Auflösung bestimmt werden. Die Betrachtung der zeitlichen Verläufe der Kennzahlen ermöglicht das Erkennen von signifikanten Änderungen, die einen direkten Rückschluss auf die Treibstoffeffizienz des Luftfahrzeugs geben. Im Unterschied dazu benötigen die aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren häufig über einen deutlich längeren Zeitraum (beispielsweise einen Monat) gemittelte Daten, um eine (gegenüber der vorliegenden Erfindung weniger genaue) Aussage über die Treibstoffeffizienz machen zu können.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist weiterhin ein Verfahren zur Prädiktion des Einflusses einer Modifikation eines Luftfahrzeugs auf dessen Treibstoffeffizienz, unter Verwendung eines erfindungsgemäßen Simulationsmodells für dieses Luftfahrzeug vor Vornahme der Modifikation, welches durch folgende Schritte gekennzeichnet ist:

- a. Berechnung der Treibstoffeffizienz unter Verwendung des Simulationsmodells,
- b. Identifikation der anpassbaren Parameter, die durch die vorgesehene Modifikation beeinflusst und/oder geändert werden,
- c. Änderung dieser identifizierten Parameter auf voraussichtliche Werte nach Vornahme der Modifikation
- d. erneute Berechnung der Treibstoffeffizienz unter Verwendung des Simulationsmodells mit den geänderten Parametern,
- e. Vergleich der berechneten Treibstoffeffizienz ohne und mit vorgesehener Modifikation.

Durch die erfindungsgemäße Prädiktion des Einflusses einer Modifikation eines Luftfahrzeugs auf dessen Treibstoffeffizienz wird der vorliegenden Erfindung ein weiterer Anwendungsbereich eröffnet, welcher zu weiteren Vorteilen gegenüber dem Stand der Technik führt. Insbesondere kann durch das Verfahren vorhergesagt werden, auf welche Weise eine geplante Modifikation des Luftfahrzeugs dessen Treibstoffeffizienz beeinflussen wird, ohne dass es erforderlich ist, die geplante Modifikation tatsächlich in die Realität umzusetzen.

Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin ein Verfahren zur Ermittlung der Veränderung der Treibstoffeffizienz eines Luftfahrzeugs zwischen einem ersten Zeitpunkt oder Zeitraum und einem zweiten Zeitpunkt oder Zeitraum, unter Verwendung eines erfindungsgemäß aufgestellten und optimierten Simulationsmodells für das Luftfahrzeug, gekennzeichnet durch folgende Schritte:

- a. Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen für den ersten Zeitpunkt oder den ersten Zeitraum,
- b. Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen für den zweiten Zeitpunkt oder den zweiten Zeitraum,
- c. Vergleich der gemäß den Schritte a. und b. ermittelten anpassbaren physikalischen Parameter,
- d. Ermittlung der für Unterschiede in der Treibstoffeffizienz kausalen anpassbaren physikalischen Parameter.

Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens kann auf diese Weise festgestellt werden, ob sich die Treibstoffeffizienz eines Luftfahrzeugs zwischen zwei Zeitpunkten oder zwischen einem ersten Zeitraum und einem auf den ersten Zeitraum folgenden zweiten Zeitraum verändert hat. In dem für jeden Zeitpunkt bzw. jeden Zeitraum mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens die jeweiligen physikalischen Parameter ermittelt werden, können diejenigen physikalischen Parameter identifiziert werden, welche für Veränderungen der Treibstoffeffizienz verantwortlich sind. Dadurch können die Ursachen einer Abnahme der Treibstoffeffizienz identifiziert werden. Beispielsweise können fehlerhafte oder mangelhaft arbeitende Systemkomponenten (wie zum Beispiel aerodynamische Flächen) identifiziert werden.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist weiterhin ein Verfahren zum Vergleich der Treibstoffeffizienz von wenigstens

zwei Luftfahrzeugen, unter Verwendung eines nach einem der Ansprüche 1 bis 9 aufgestellten und optimierten Simulationsmodells für jedes dieser Luftfahrzeuge. Das Verfahren ist gekennzeichnet durch folgende Schritte:

- a. Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 für jedes dieser Luftfahrzeuge,
- b. Vergleich der für jedes dieser Luftfahrzeuge durch Optimierungsrechnung ermittelten anpassbaren physikalischen Parameter
- c. Ermittlung der für Unterschiede in der Treibstoffeffizienz kausalen anpassbaren physikalischen Parameter.

Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht die durch die Optimierungsrechnung festgelegten Parameter mit denen anderer Luftfahrzeuge zu vergleichen und eventuelle Abweichungen zu identifizieren. Die Auswirkungen der Abweichungen können anhand des Gesamtmodells beurteilt werden.

Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin ein Computerprogrammprodukt, ausgebildet zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 12.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels beschrieben. Es zeigen:

Figur 1: ein schematisches Ablaufdiagramm zur Illustration des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen;

Figur 2: ein schematisches Diagramm zur Illustration des erfindungsgemäßen Simulationsmodells;

Figur 3: ein schematisches Ablaufdiagramm zur Illustration des Gewinnung von erfindungsgemäßen physikalischen Messgrößen;

Figur 4: eine Gegenüberstellung eines gemessenen spezifischen Treibstoffverbrauchs und eines mit Hilfe der Erfindung gewonnenen simulierten spezifischen Treibstoffverbrauchs im Zeitverlauf.

Nachfolgend wird ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Bewertung der Treibstoffeffizienz eines Luftfahrzeugs erläutert. Dabei wird die Treibstoffeffizienz insbesondere vor und nach der Vornahme einer Modifikation am Luftfahrzeug betrachtet. Bei der vorgenommenen Modifikation handelt es sich um das Anbringen von sogenannten Winglets an den Hauptflügeln des betrachteten Luftfahrzeugs. Durch diese Modifikation wird die Aerodynamik des Luftfahrzeugs beeinflusst, was einen positiven Effekt auf die Treibstoffeffizienz hat. Wie nachfolgend erläutert, kann das erfindungsgemäße Verfahren dazu verwendet werden, diesen positiven Effekt mit hoher Genauigkeit zu quantifizieren.

Figur 1 zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm zur Illustration des erfindungsgemäßen Verfahrens. Zunächst wird gemäß Verfahrensschritt 13 ein Simulationsmodell zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs im Flugbetrieb für das betrachtete Luftfahrzeug aufgestellt. Anschließend werden gemäß Verfahrensschritt 14 physikalische Messgrößen ermittelt, welche insbesondere den tatsächlichen Treibstoffverbrauch und zudem weitere der oben bereits beschriebenen Größen umfassen. Schließlich wird gemäß Verfahrensschritt 15 eine Optimierungsrechnung zur Anpassung von anpassbaren physikalischen Parametern durchgeführt, so dass gemäß dem Simulationsmodell berechneter und

tatsächlich gemessener Treibstoffverbrauch im Flugbetrieb im Wesentlichen übereinstimmen.

Das Simulationsmodell basiert auf einem physikalischen Modell des Flugbetriebs. Der schematische Aufbau dieses Modells ist in Figur 2 illustriert. Das physikalische Modell des Flugbetriebs 20 umfasst vier Teilmodelle: ein thermodynamisches Triebwerksmodell 21, ein kinematisches Modell der Flugphysik 22, ein strömungsphysikalisches Modell der Aerodynamik 23 und ein Modell der Systemtechnik 24.

Das physikalische Modell des Flugbetriebs 20 basiert auf dem Prinzip der Energieerhaltung. Mit Hilfe des thermodynamischen Triebwerksmodells 21 wird in Kombination mit dem kinematischen Modell der Flugphysik 22 und dem strömungsphysikalischen Modell der Aerodynamik 23 mathematisch nachgebildet, welche Treibstoffmenge erforderlich ist, um einen gewünschten Vorschub zu erzeugen, mit dem der Flugbetrieb aufrecht erhalten werden kann. Zusätzlich fließt das Modell der Systemtechnik 24 ein, um den Energieverbrauch der Systemkomponenten des Flugzeugs zu berücksichtigen.

In Figur 2 ist gezeigt, dass physikalische Konstanten 26 und physikalische Messgrößen 27 in das Modell 20 einfließen. Zudem umfasst das Modell 20 anpassbare physikalische Parameter 25.

Bei den physikalischen Konstanten 26 handelt es sich um feste physikalische Größen wie beispielsweise die Erdbeschleunigung. Die physikalischen Messgrößen 27 werden während des Flugbetriebs des betrachteten Flugzeugs im Rahmen des Verfahrensschrittes 14 gemessen. Eine der gemessenen physikalischen Messgrößen ist der tatsächliche Treibstoffverbrauch des Flugzeugs.

Im Rahmen des Verfahrensschrittes 15 wird mit Hilfe des Simulationsmodells eine Optimierungsrechnung durchgeführt. Durch die Optimierungsrechnung werden die anpassbaren physikalischen Parameter 25 so verändert, dass der gemessene tatsächliche Treibstoffverbrauch des Flugzeugs übereinstimmt mit dem im Rahmen des Simulationsmodells berechneten Treibstoffverbrauchs, welcher zur Aufrechterhaltung des jeweiligen Flugzustandes erforderlich ist. Das Ergebnis dieser Optimierungsrechnung ist eine Mehrzahl von angepassten physikalischen Parametern 28. Anhand der angepassten physikalischen Parameter 28 kann mit hoher Genauigkeit auf die Treibstoffeffizienz des Flugzeugs geschlossen werden.

Figur 3 zeigt ein weiteres schematisches Ablaufdiagramm zur Illustration der Gewinnung der erfindungsgemäßen physikalischen Messgrößen.

Zur Gewinnung der physikalischen Messgrößen werden in dem Ausführungsbeispiel zunächst Flugdaten 30 des betrachteten Flugzeugs erhoben. Die Flugdaten werden aus einem sogenannten Quick Access Recorder (QAR) 31 sowie aus Wartungs- und Instandhaltungslisten 32 des zu untersuchenden Flugzeugs entnommen. Die Ermittlung von Flugdaten mit Hilfe eines QAR ist grundsätzlich bekannt und soll hier nicht weiter erläutert werden.

Aus den vorliegenden Flugdaten 30 wird im Rahmen des Verfahrensschrittes 33 ein reduzierter Datensatz 34 erstellt. Dies erfolgt zum einen dadurch, dass lediglich solche Daten für die nachfolgende Simulation ausgewählt werden, welche in einer vorausgegangenen Sensitivitätsanalyse einen hinreichenden Einfluss auf den Treibstoffverbrauch gezeigt haben. Außerdem werden lediglich solche Flugdaten 30 berücksichtigt, welche 4 Monate vor und vier Monate nach der oben genannten Nachrüstung

von Winglets erfasst wurden. Diese zeitliche Einteilung findet anhand der Wartungs- und Instandhaltungslisten 32 statt, aus denen der Zeitpunkt der Nachrüstung hervorgeht. Zudem wird im Rahmen des Verfahrensschritts 33 sichergestellt, dass in dem betrachteten Zeitraum keine weiteren Modifikationen am Flugzeug vorgenommen wurden, welche die Treibstoffeffizienz wesentlich beeinflussen können. Dies kann beispielsweise durch eine manuelle Durchsicht der Wartungs-, Modifikations- und Instandhaltungsmaßnahmen erfolgen. Ergebnis der Auswahl, Überprüfung und zeitlichen Beschränkung gemäß Verfahrensschritt 33 ist der reduzierte Datensatz 34.

Anhand des reduzierten Datensatzes 34 werden nachfolgend im Rahmen des Verfahrensschritts 35 die erfindungsgemäßen physikalischen Messgrößen 27 erzeugt. Dies erfolgt dadurch, dass zunächst anhand des reduzierten Datensatzes 34 Reiseflugereignisse festgelegt werden. Ein Reiseflugereignis wird durch ein Zeitfenster definiert, innerhalb dessen die im reduzierten Datensatz 34 enthaltenen Flugdaten bestimmten Anforderungen genügen. Beispielsweise kann festgelegt werden, dass sich die Mach-Zahl des Luftfahrzeuges innerhalb eines betrachteten Zeitfensters in einem Toleranzbereich von 0,006 um einen Mittelwert bewegen darf, damit der Datensatz zur Definition des Reiseflugereignisses in Frage kommt. Entsprechende Toleranzbereiche können auch für andere Flugdaten des Datensatzes 34 vorgegeben werden. Wird in einem betrachteten Zeitfenster für alle vorgegebenen Flugdaten der Toleranzbereich eingehalten, kann ein Reiseflugereignis generiert werden. Beispielsweise kann ein Reiseflugereignis auch als ein Zeitfenster festgelegt werden, innerhalb dessen das Flugzeug in vorgegebener Höhe stabil geradeaus geflogen ist. Für die Festlegung können außerdem geographische Daten und/oder Wetterdaten und/oder atmosphärische Daten berücksichtigt werden.

Über jedes der festgelegten Reiseflugereignisse wird nachfolgend im Rahmen des Verfahrensschritts 35 eine zeitliche Mittelwertbildung der Flugdaten vorgenommen. Die über ein Reiseflugereignis gebildeten zeitlichen Mittelwerte der Flugdaten stellen im Folgenden physikalische Messgrößen 27 dar. Die auf diese Weise erhaltenen physikalischen Messgrößen 27 werden nun eingeteilt in solche physikalische Messgrößen 27a, welche aus dem Zeitraum vor der Durchführung der Nachrüstung stammen (nachfolgend Zeitraum 1 genannt) und in physikalische Messgrößen 27b, welche aus dem Zeitraum nach der Durchführung der Nachrüstung stammen (nachfolgend Zeitraum 2 genannt).

Um den Einfluss der vorgenommenen Nachrüstung von Winglets auf die Treibstoffeffizienz zu untersuchen, werden zunächst die physikalischen Messgrößen 27a aus dem Zeitraum 1 dem Simulationsmodell zugeführt und eine entsprechende Optimierungsrechnung zur Berechnung von angepassten physikalischen Parametern 28a durchgeführt. Anschließend werden die physikalischen Messgrößen 27b des Zeitraums 2 dem Simulationsmodell zugeführt und angepasste Parameter 28b ermittelt.

Beispielhafte angepasste Parameter 28a, 28b sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Parametername	Parameter 28a (Zeitraum 1)	Parameter 28b (Zeitraum 2)
C_{A0}	0.272	0.281
$C_{A\alpha}$	0.109	0.123
C_{W0}	0.0182	0.0185
k_1	-0.002	-0.004
k_2	0.046	0.039

π_{BK}	0.993	0.993
------------	-------	-------

Tabelle 1

Die genannten Parameter bezeichnen den Null-Auftriebsbeiwert C_{A0} , das vom Anstellwinkel α abhängige Derivat $C_{A\alpha}$, den Null-Widerstandsbeiwert C_{W0} , den Koeffizienten für den linearen Anteil des induzierten Widerstands k_1 , den Koeffizienten für den quadratischen Anteil des induzierten Widerstands k_2 und den Druckverlust in der Brennkammer π_{BK} .

Für den Zeitraum 2 ist gegenüber dem Zeitraum 1 eine signifikante Erhöhung von C_{A0} und $C_{A\alpha}$ zu erkennen. Es kann darauf geschlossen werden, dass durch die Winglets ein erhöhter Auftriebsbeiwert des Flugzeugs ermöglicht und insbesondere in Abhängigkeit des Anstellwinkels α ein höherer Auftrieb als zuvor generiert wird. Damit ist ein geringerer Anstellwinkel für den gleichen Betriebszustand (beispielsweise bei gleicher Machzahl, Grossweight und Altitude) notwendig. Hierdurch reduziert sich der Gesamtwiderstand und folglich der Treibstoffverbrauch. Geringfügig erhöht sich der Null-Widerstandsbeiwert C_{W0} , was gegenüber dem reduzierten, induzierten Widerstand weniger stark ins Gewicht fällt. Dies geht aus den Koeffizienten k_1 und k_2 hervor. Durch die Abnahme der Werte hat sich der induzierte Widerstand gegenüber dem Zustand ohne Winglets deutlich verringert. Der von der Nachrüstung physikalisch unabhängige Druckverlust in der Brennkammer π_{BK} bleibt über die beiden Zeiträume unverändert.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren kann auf diese Weise der Einfluss der Modifikation (Nachrüstung von Winglets) auf die Treibstoffeffizienz des Luftfahrzeugs auf äußerst genaue Weise nachvollzogen und ermittelt werden. Insbesondere kann der Einfluss der Modifikation anhand der verschiedenen ermittelten

angepassten physikalischen Parameter 28 (bzw. 28a und 28b) in seinen Wirkungen aufgeschlüsselt werden, so dass ein deutlich verbessertes Verständnis über die Wirkungen der vorgenommenen Maßnahme gewonnen werden kann.

Anhand der in Tabelle 1 gezeigten Veränderung der angepassten physikalischen Parameter 28a, 28b, welche durch die Nachrüstung von Winglets begründet ist, kann mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens außerdem mit hoher Genauigkeit quantifiziert werden, welchen tatsächlichen Einfluss die Nachrüstung auf den Treibstoffverbrauch hat. Dazu kann mit Hilfe des erfindungsgemäßen Simulationsmodells der spezifische Treibstofffluss simuliert werden, welchen das Luftfahrzeug im zweiten Zeitraum gehabt hätte, wenn die Nachrüstung nicht vorgenommen worden wäre.

Für diese Simulation des spezifischen Treibstoffflusses im zweiten Zeitraum werden dem Simulationsmodell die physikalischen Messgrößen 27b zugeführt, wobei im Rahmen der Simulation anstelle der oben genannten Parameter 28b die aus dem ersten Zeitraum erhaltenen Parameter 28a verwendet werden. Da die Parameter 28a den Zustand vor Vornahme der Nachrüstung repräsentieren, kann durch diese Vorgehensweise ein hypothetischer spezifischer Treibstofffluss berechnet werden, welcher im zweiten Zeitraum erforderlich gewesen wäre, wenn die Modifikation nicht vorgenommen worden wäre. Dieser hypothetische spezifische Treibstofffluss ist für den zweiten Zeitraum in Figur 4 gezeigt.

In Figur 4 ist der Treibstofffluss im Zeitverlauf aufgetragen. Der Zeitpunkt der Nachrüstung der Winglets ist durch die Markierung 43 gekennzeichnet. Die durchgezogene Linie 41 zeigt den tatsächlich gemessenen spezifischen Treibstofffluss im

Zeitverlauf. Die gestrichelte Linie 42 zeigt den oben erwähnten hypothetischen spezifischen Treibstofffluss im Zeitverlauf für den zweiten Zeitraum. Die Differenz zwischen der gestrichelten und der durchgezogenen Linie im zweiten Zeitraum stellt die tatsächliche spezifische Treibstoffersparnis des Luftfahrzeugs dar, welche durch die Nachrüstung erreicht wurde. Die Genauigkeit der Treibstoffersparnis kann auf diese Weise deutlich genauer ermittelt werden, als dies mit aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren möglich ist.

Das oben beschriebene Verfahren kann zur Ermittlung der oben genannten angepassten physikalischen Parameter auf analoge Weise auch dann verwendet werden, wenn keine Modifikation am Luftfahrzeug vorgenommen wird. Anhand von Veränderungen der angepassten physikalischen Parameter im Zeitverlauf kann auf diese Weise ein Rückschluss auf den Zustand des Luftfahrzeugs gezogen werden. Insbesondere kann der Zustand von solchen Teilen und Komponenten des Luftfahrzeugs überwacht werden, welche einen Einfluss auf die jeweiligen angepassten physikalischen Parameter haben. Es können so Verschlechterungen dieser Teile oder Komponenten festgestellt werden, welche bei üblichen Wartungsmaßnahmen nicht oder erst verspätet auffallen würden.

Weiterhin kann das erfindungsgemäße Verfahren auch auf analoge Weise angewendet werden, um zwei unterschiedliche, vorzugsweise baugleiche Luftfahrzeuge miteinander zu vergleichen.

Schließlich kann mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens auch vorhergesagt werden, auf welche Weise eine geplante Modifikation den Treibstoffverbrauch beeinflussen wird. Dazu muss eine Abschätzung vorgenommen werden, auf welche Weise die geplante Modifikation die anpassbaren physikalischen Parameter verändern wird. Die entsprechend veränderten physikalischen

Parameter können anschließend in das Simulationsmodell einfließen und der voraussichtliche Einfluss auf den Treibstoffverbrauch entsprechend ermittelt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bewertung der Treibstoffeffizienz von Luftfahrzeugen, gekennzeichnet durch folgende Schritte:
 - a. Aufstellen eines Simulationsmodells zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs im Flugbetrieb auf Basis eines physikalischen Modells des Flugbetriebs, wobei das Simulationsmodell physikalische Konstanten, physikalische Messgrößen und anpassbare physikalische Parameter umfasst,
 - b. Messung der physikalischen Messgrößen im Flugbetrieb, wobei die physikalischen Messgrößen den tatsächlichen Treibstoffverbrauch umfassen;
 - c. Durchführen einer Optimierungsrechnung zur Anpassung der anpassbaren physikalischen Parameter dergestalt, dass gemäß dem Simulationsmodell berechneter und tatsächlich gemessener Treibstoffverbrauch im Flugbetrieb im Wesentlichen übereinstimmen.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das physikalische Modell auf dem Energieerhaltungssatz basiert, wobei im Rahmen des physikalischen Modells die dem Treibstoffverbrauch zuzuordnende Energiemenge verglichen oder gleichgesetzt wird mit der für die Aufrechterhaltung des Flugbetriebs erforderliche Energiemenge.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass den anpassbaren physikalischen Parametern vor Beginn der Optimierungsrechnung physikalisch sinnvolle Startwerte und/oder Wertebereiche zugeordnet werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Simulationsmodell Teilmodelle umfasst, welche ausgewählt sind aus der Gruppe: thermodynamisches Triebwerksmodell, kinematisches Modell der Flugphysik, strömungsphysikalisches Modell der Aerodynamik, Modell der Systemtechnik.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass physikalische Messgrößen ausgewählt sind aus der Gruppe bestehend aus: thermodynamische Messgrößen, kinematische Messgrößen, aerodynamische Messgrößen und systemtechnische Messgrößen.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Messung des tatsächlichen Treibstoffverbrauchs und der physikalischen Messgrößen im Flugbetrieb über einen definierten Zeitraum während eines definierten Reiseflugereignisses stattfindet, wobei die Definition des Reiseflugereignisses vorzugsweise geographische Daten und/oder Wetterdaten und/oder atmosphärische Daten umfasst.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Messung des tatsächlichen Treibstoffverbrauchs und der physikalischen Messgrößen über eine Mehrzahl von Reiseflugereignissen erfolgt und vorzugsweise eine Mittelung der Messergebnisse vorgenommen wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Optimierungsrechnung zur Anpassung der anpassbaren physikalischen Parameter unter Verwendung eines Fittingalgorithmus, vorzugsweise eines genetischen Algorithmus, durchgeführt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass basierend auf dem physikalischen Modell und den ermittelten anpassbaren Parametern Kennzahlen zur Bewertung der Treibstoffeffizienz eines Luftfahrzeugs ermittelt werden.
10. Verfahren zur Prädiktion des Einflusses einer Modifikation eines Luftfahrzeugs auf dessen Treibstoffeffizienz, unter Verwendung eines nach einem der Ansprüche 1 bis 9 aufgestellten und optimierten Simulationsmodells für dieses Luftfahrzeug vor Vornahme der Modifikation, gekennzeichnet durch folgende Schritte:
 - a. Berechnung der Treibstoffeffizienz unter Verwendung des Simulationsmodells,
 - b. Identifikation der anpassbaren Parameter, die durch die vorgesehene Modifikation beeinflusst und/oder geändert werden,
 - c. Änderung dieser identifizierten Parameter auf voraussichtliche Werte nach Vornahme der Modifikation,
 - d. erneute Berechnung der Treibstoffeffizienz unter Verwendung des Simulationsmodells mit den geänderten Parametern,
 - e. Vergleich der berechneten Treibstoffeffizienz ohne und mit vorgesehener Modifikation.
11. Verfahren zur Ermittlung der Veränderung der Treibstoffeffizienz eines Luftfahrzeugs zwischen einem ersten Zeitpunkt oder Zeitraum und einem zweiten Zeitpunkt oder Zeitraum, unter Verwendung eines nach einem der Ansprüche 1

bis 9 aufgestellten und optimierten Simulationsmodells für das Luftfahrzeug, gekennzeichnet durch folgende Schritte:

- a. Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 für den ersten Zeitpunkt oder den ersten Zeitraum,
 - b. Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 für den zweiten Zeitpunkt oder den zweiten Zeitraum,
 - c. Vergleich der gemäß den Schritte a. und b. ermittelten anpassbaren physikalischen Parameter,
 - d. Ermittlung der für Unterschiede in der Treibstoffeffizienz kausalen anpassbaren physikalischen Parameter.
12. Verfahren zum Vergleich der Treibstoffeffizienz von wenigstens zwei Luftfahrzeugen, unter Verwendung eines nach einem der Ansprüche 1 bis 9 aufgestellten und optimierten Simulationsmodells für jedes dieser Luftfahrzeuge, gekennzeichnet durch folgende Schritte:
- a. Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 für jedes dieser Luftfahrzeuge,
 - b. Vergleich der für jedes dieser Luftfahrzeuge durch Optimierungsrechnung ermittelten anpassbaren physikalischen Parameter,

c. Ermittlung der für Unterschiede in der Treibstoffeffizienz kausalen anpassbaren physikalischen Parameter.

13. Computerprogrammprodukt, ausgebildet zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9.

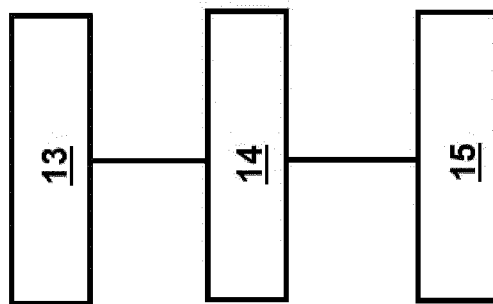


Fig. 1

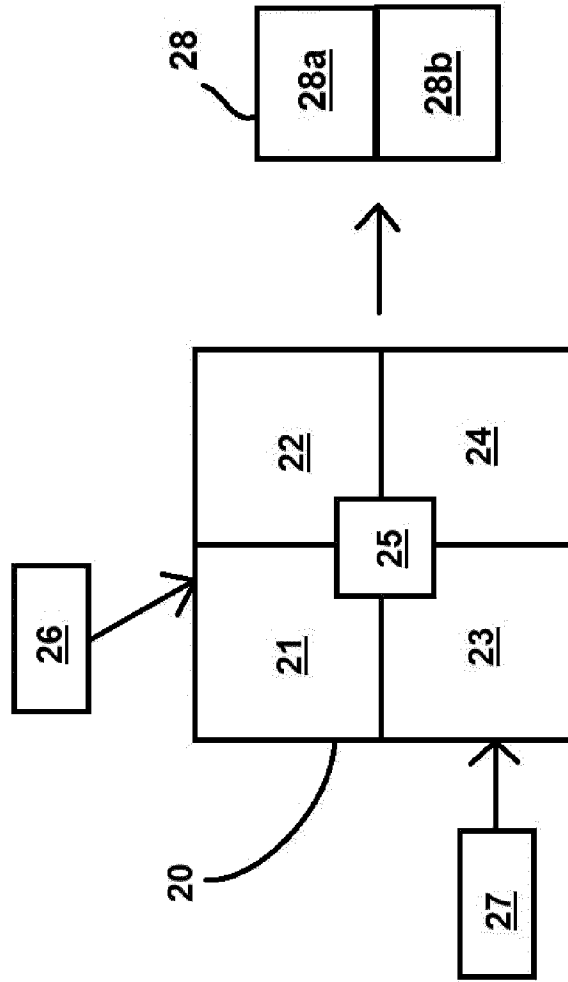


Fig. 2

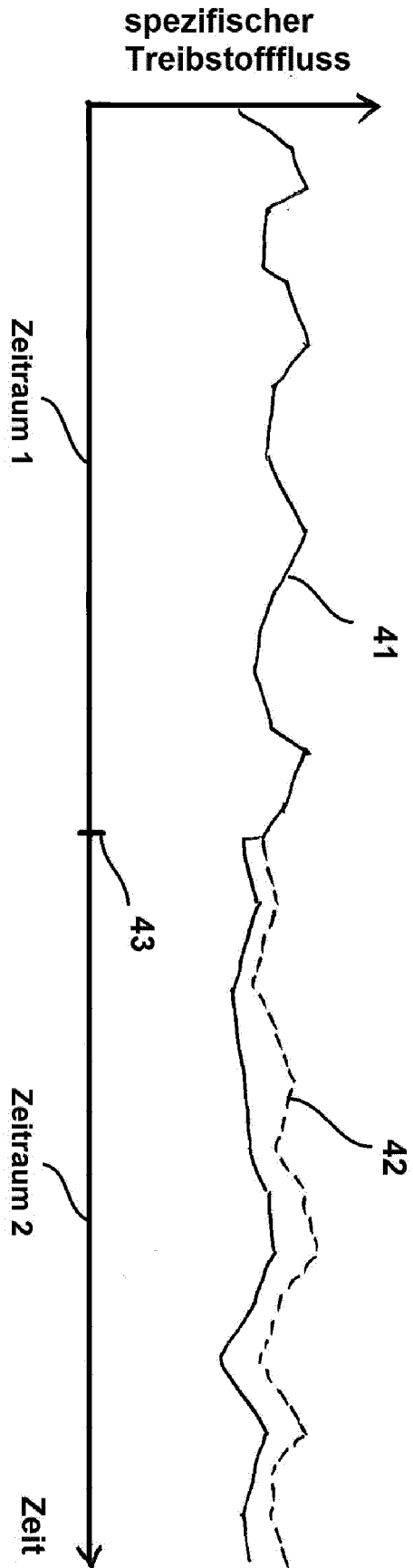


Fig. 4

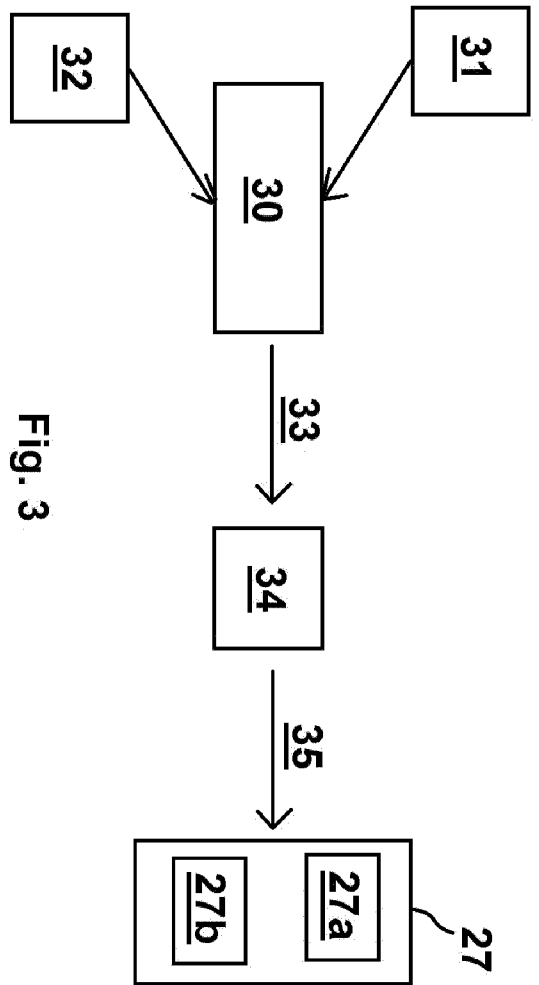


Fig. 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/080998

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>G05B 17/02</i> (2006.01) According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G05B Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 9177479 B2 (GEN ELECTRIC [US]) 03 November 2015 (2015-11-03) column 2, line 62 - column 8, line 67	1-13
A	FR 2885392 A1 (PEUGEOT CITROEN AUTOMOBILES SA [FR]) 10 November 2006 (2006-11-10) page 1, line 1 - page 4, line 37 page 9, line 6 - page 11, line 7	1-13
A	US 2009112535 A1 (PHILLIPS JAMES D [US]) 30 April 2009 (2009-04-30) paragraphs [0046] - [0061]; figures 1-3	1-13
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 12 February 2020		Date of mailing of the international search report 25 February 2020
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Sollazzo, P Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2019/080998

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	9177479	B2	03 November 2015	BR	102014005705	A2	03 November 2015
				ES	2523701	A2	28 November 2014
				GB	2514226	A	19 November 2014
				US	2014277853	A1	18 September 2014
FR	2885392	A1	10 November 2006	NONE			
US	2009112535	A1	30 April 2009	NONE			

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G05B17/02
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 G05B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 9 177 479 B2 (GEN ELECTRIC [US]) 3. November 2015 (2015-11-03) Spalte 2, Zeile 62 - Spalte 8, Zeile 67 -----	1-13
A	FR 2 885 392 A1 (PEUGEOT CITROEN AUTOMOBILES SA [FR]) 10. November 2006 (2006-11-10) Seite 1, Zeile 1 - Seite 4, Zeile 37 Seite 9, Zeile 6 - Seite 11, Zeile 7 -----	1-13
A	US 2009/112535 A1 (PHILLIPS JAMES D [US]) 30. April 2009 (2009-04-30) Absätze [0046] - [0061]; Abbildungen 1-3 -----	1-13



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

12. Februar 2020

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

25/02/2020

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
 Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Sollazzo, P

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/080998

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung	
US 9177479	B2	03-11-2015	BR 102014005705 A2	03-11-2015
			ES 2523701 A2	28-11-2014
			GB 2514226 A	19-11-2014
			US 2014277853 A1	18-09-2014

FR 2885392	A1	10-11-2006	KEINE	

US 2009112535	A1	30-04-2009	KEINE	
