

Verfahren zur Wartungsplanung von Flugzeugtriebwerken

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Wartungsplanung von Flugzeugtriebwerken.

Auf dem technischen Gebiet der Wartung bzw. Instandhaltung von Flugzeugtriebwerken ist es bekannt, diese nach festen Wartungsintervallen zu warten. Darüber hinaus kann es zusätzliche Werkstattaufenthalte, sogenannte Shop Visits, geben, die z.B. in Abhängigkeit eines erfassten oder berechneten Triebwerkszustands oder auch bei einem (Bauteil-)Versagen durchgeführt werden. Dabei werden die Wartungsintervalle häufig durch den Hersteller der Triebwerke oder die das Triebwerk betreibende Airline vorgegeben.

Die von den Triebwerksherstellern vorgegebenen Wartungsintervalle sind i.d.R. konservativ ausgelegt und hinsichtlich Kosten und/oder Wartungsaufwand nicht optimiert. Vor diesem Hintergrund wurden im Stand der Technik Ansätze entwickelt, um Instandhaltungs-/Wartungspläne für einzelne Triebwerke mittels Software zu optimieren. Diese Vorgehensweise ist derzeit vorherrschend bei der Wartungsplanung für Flugzeugtriebwerke. Bei einer solchen Einzeloptimierung kann es widersprüchliche äußere Einflussfaktoren geben, die die Komplexität der Optimierung erhöhen. Bspw. kann man potentiell Aufwand einsparen, in dem man die Wartungsintervalle maximiert, da man über die gesamte Lebenszeit des Triebwerks ggf. einen Shop Visit einsparen kann. Allerdings gibt es auch den Effekt, dass spätere Shop Visits in der Regel teurer sind (hauptsächlich wegen steigender Materialpreise), so dass sich, je nach dem was für Annahmen man trifft, ein anderes Optimum der Wartungsintervalle ergeben kann.

Betrachtet man nun eine ganze Triebwerksflotte, dann ergibt sich für diese in der Regel ein anderes Optimum für die Wartungsintervalle der einzelnen Triebwerke als bei der losgelösten Einzeloptimierung derselben Triebwerke. Hierdurch resultiert für Triebwerksflotten ein großes Optimierungspotential, dass gegenüber der Einzeloptimierung von Triebwerken noch gehoben werden kann. Jedoch ergibt sich

bei einer Optimierung über eine ganze Triebwerksflotte hinweg und unter Berücksichtigung mehrerer äußeren Einflussfaktoren aufgrund der hohen Komplexität auch ein NP-vollständiges Problem, welches sich nicht auf einfache Weise deterministisch lösen lässt, sondern ausgefeilte Softwarelösungen erfordert.

Eine Aufgabe einer Ausführung der vorliegenden Erfindung ist es vor diesem Hintergrund, ein verbessertes Verfahren zum automatisierten Erstellen und Optimieren eines Wartungsplans für eine Flotte von Flugzeugtriebwerken bereitzustellen.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 oder des Anspruchs 5, ein Computerprogramm nach Anspruch 11 oder eine Vorrichtung nach Anspruch 12 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Ein erster Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft ein Verfahren, insbesondere ein computerimplementiertes Verfahren, zum automatisierten Erstellen eines optimierten Wartungsplans für eine Flotte von Flugzeugtriebwerken, wobei das Verfahren zumindest die folgenden Schritte aufweist:

- a) Erfassen von Eingangsdaten zu einer Mehrzahl von Triebwerken, die für die Flotte von Flugzeugtriebwerken individuell und/oder insgesamt wartungsbezogene Informationen repräsentieren und insbesondere eine gemittelte Standzeit („Mean Time Between Shop Visits (MTBSV)“) oder Daten bezüglich lebensdauerbegrenzter Bauteile (Life limited Parts (LLP)) der Triebwerke der Triebwerksflotte umfassen (diese Daten können aber bspw. auch beliebige einzuhaltende zeitliche oder technische Randbedingung für die Wartung der Flugzeugtriebwerke und/oder zumindest einen Einflussfaktor, auf den für die Wartung der Flotte zu leistenden Aufwand repräsentieren);
- b) Bereitstellen eines vorhandenen Ausgangswartungsplans oder Erstellen eines Ausgangswartungsplans anhand der erfassten Eingangsdaten, insbesondere der MTBSV und oder LLP-Daten, für die Triebwerke;

- c) Bestimmen eines Gesamt-Wartungsaufwands für die Flotte Falle einer Anwendung des initialen Wartungsplans, wie beispielsweise Gesamtkosten oder ein Gesamtzeit- oder Materialaufwand;
- d) Sortieren der Triebwerke in eine definierte Reihenfolge nach zumindest einem Kriterium, insbesondere nach einem geschätzten Wartungsaufwand oder geschätzten Wartungskosten (je Triebwerk);
- e) Anwenden zumindest einer Optimierungsstrategie oder Heuristik (beispielhafte Optimierungsstrategien werden an späterer Stelle beschrieben), die insbesondere als Algorithmus in einem Computerprogramm hinterlegt sein kann, auf die jeweiligen Triebwerke der Triebwerksflotte in der definierten Reihenfolge; und
- f) Ausgeben eines nach Anwendung von Schritt e) optimierten Wartungsplans für die Triebwerke (der Wartungsplan kann insbesondere Wartungsintervalle und Umfänge der einzelnen Shop Visits umfassen) und optional zusätzlicher Ausgabedaten, die insbesondere einen geschätzten Gesamt-Wartungsaufwand des optimierten Wartungsplans umfassen, z.B. Gesamtkosten oder Gesamtzeitaufwand nach der Optimierung. Bevorzugt kann der Einfluss der angewandten Optimierungsstrategie(en) beim Optimieren eines des Triebwerke auf die anderen Triebwerke der Flotte in dem Verfahren mitberücksichtigt werden.

Ein solches erfindungsgemäßes Optimierungsverfahren nach dem ersten Aspekt ermöglicht es durch die Vorsortierung der Triebwerke und nach erwartetem Aufwand Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Triebwerken der Flotte gegenüber der Einzeloptimierung ein größeres Einsparpotential zu bergen. Die genannten Optimierungsstrategien können vorprogrammierte oder vorbestimmte Optimierungsalgorithmen bzw. Heuristiken sein. Ein Beispiel für eine solche Strategie könnte ein Algorithmus sein, der einen Shop Visit, bei dem LLPs ersetzt werden sollen, im Wartungsplan zu einem Shop Visit ohne Ersetzen der LLPs reduziert, wenn die Bedingung erfüllt ist, dass weniger als 2 LLPs in nicht mehr als einem Triebwerksmodul betroffen sind.

Gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel kann beim Ausführen von Schritt e) zunächst zumindest eine Optimierungsstrategie auf das erste Triebwerk angewandt

werden, wobei Auswirkungen dieser Optimierung auf die anderen Triebwerke der Flotte mitberücksichtigt werden, (bspw. Verschiebung der Shop Visits, Verfügbarkeit von Ersatzteilen etc.) und anschließend ein Gesamt-Wartungsaufwand für die ganze Flotte nach diesem Teilschritt ermittelt werden. In dem Fall, dass sich der Gesamt-Wartungsaufwand für die Gesamtflotte durch Anwenden der Strategie am ersten Triebwerk verringert, kann die Optimierung beibehalten und zum nächsten Triebwerk in der Flotte fortgeschritten werden oder, wenn ein vorbestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist, könnte die Optimierung an dieser Stelle auch beendet werden. In dem Fall, dass sich der Gesamt-Wartungsaufwand für die Triebwerksflotte durch Anwenden der Strategie am ersten Triebwerk nicht-verringert könnte entweder eine andere Strategie auf das erste Triebwerk angewendet oder ohne Optimierung des ersten Triebwerks zu nächsten Triebwerk fortgeschritten werden oder die Optimierung abgebrochen werden. So kann in einer weiter bevorzugten Ausgestaltung in der vorsortierten Reihenfolge eine Optimierung der einzelnen Triebwerke erfolgen, wobei Wechselwirkungen zwischen den Triebwerken in die Betrachtung eingehen. In einer alternativen Ausführungsform könnten beim sequentiellen Anwenden der ausgewählten Optimierungsstrategie(en) eine Strategie auf ein Triebwerk dann nicht angewandt werden, wenn dadurch ein Wartungsplan eines bereits zuvor optimierten Triebwerks verändert werden würde. Ein solches weiter verfeinertes Optimierungsverfahren nach dem ersten Aspekt vereinfacht es gegenüber der herkömmlichen, ein Optimum auf Flottenebene zu finden Synergien zu berücksichtigen und somit in eine größeren Gesamtoptimierung oder Kostenersparnis zu erzielen, als es ein individuelles Optimieren der einzelnen Triebwerke bewerkstelligen könnte.

Gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung können nach dem sequenziellen Anwenden zumindest einer Optimierungsstrategie oder Heuristik an jedem der Triebwerke gemäß Schritt e) die Triebwerke erneut gemäß Schritt d) nach dem zumindest einen Kriterium sortiert und nach diesem Schritt erneut eine Optimierungsstrategie oder Kombination von Optimierungsstrategien in der neu ermittelten Reihenfolge an den jeweiligen Triebwerken angewandt werden.

In einer weiter bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung kann in Schritt f) neben dem optimierten Wartungsplan auch Ausgabedaten, insbesondere ein geschätzter Gesamt-Wartungsaufwand oder geschätzte Gesamtkosten, ausgegeben werden. Die Schritte d) und e) können in diesem Fall so lange iteriert werden, bis anhand der o.g. Ausgabedaten ein vorbestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist, beispielsweise eine Arbeitszeitreduktion oder Kostenreduktion um einen definierten Prozentsatz. Alternativ kann z.B. auch eine vorgegebene Anzahl an Iterationszyklen als Abbruchkriterium definiert sein. Bevorzugt können die Triebwerke der Flotte vor jeder neuen Iteration nach dem zumindest einen Kriterium neu sortiert werden.

Bei einem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel kann bei jeder Iteration eine andere Optimierungsstrategie oder Heuristik angewandt werden. Während der Iterationen können auch unterschiedliche Planungsstrategien kombiniert werden. Hierbei können die einzelnen Flugzeugtriebwerke jeweils einzeln oder auch als Kollektiv optimiert werden, da die Planungsstrategien für jedes einzelne Flugzeugtriebwerk auch auf die Gesamtplanungsstrategie aller Flugzeugtriebwerke einer Flotte Einfluss haben kann. Entsprechend werden durch das angewandte Verfahren bzw. dem angewandten Algorithmus Kombinationen berechnet, welche Schritt für Schritt im iterativen Prozess zu geringen Gesamtbetriebskosten führen. Für jeden Wartungsplan, welcher durch das Verfahren in den einzelnen Iterationsschritten bestimmt wird, können unterschiedliche Wartungsstrategien unabhängig voneinander ausgewählt und angewandt werden. In einer bevorzugten Ausgestaltung können die aus den einzelnen Iterationen generierten Ergebnisse miteinander verglichen werden, insbesondere mit dem jeweils vorherigen bestimmten Wartungsplan. Sollte eine angewandte Optimierungsstrategie zu einem schlechteren Ergebnis/Ausgabewert führen als der vorherig bestimmte Wartungsplan, kann der Algorithmus zu diesem vorherigen Plan zurückspringen und eine alternative Optimierungsstrategie auf diesen anwenden. Daher muss ein Benutzer die Strategien und Synergien zwischen den einzelnen Wartungsplänen der einzelnen Flugzeugtriebwerke und Teilflotten nicht vorab manuell bestimmen und festlegen, sondern diese werden durch das Verfahren automatisiert iterativ identifiziert. In anderen Worten kann das erfindungsgemäße Verfahren eine Auswahl

an vordefinierten bzw. vorprogrammierten Optimierungsstrategien aufweisen, die dann jeweils sequenziell an den einzelnen Triebwerken der Flotte angewandt und in mehreren Iterationen durchgewechselt werden, bis ein bestimmtes Abbruchkriterium erfüllt oder ein lokales Optimum erreicht ist.

Bei einigen Ausführungsformen kann das iterative Optimieren in jeder Iteration ferner den Schritt aufweisen: Festlegen des dieser Iteration zugeordneten optimierten Wartungsplans für die Flotte auf Basis einer Aggregation der aus dieser Iteration resultierenden individuellen Wartungspläne bezüglich der einzelnen Flugzeugtriebwerke.

Durch die individuelle Optimierung jedes Wartungsplans eines jeden Flugzeugtriebwerks kann der Wartungsplan für die Flotte ebenfalls weiter optimiert werden.

Bei einigen Ausführungsformen kann für die Bestimmung des Wartungsplans und/oder für die Bestimmung der jeweiligen individuellen Wartungspläne eine Wechselwirkung der Wartungsmaßnahmen für die einzelnen Flugzeugtriebwerke berücksichtigt werden. Beispielsweise kann die Verfügbarkeit eines Flugzeugtriebwerks als Eingangsdaten dazu führen, dass ein auszutauschendes Flugzeugtriebwerk zu einem bestimmten Zeitpunkt durch das verfügbare Flugzeugtriebwerk ausgetauscht werden kann, wohingegen ein anderes auszutauschendes Flugzeugtriebwerk erst zu einem späteren Zeitpunkt ausgetauscht werden kann, da das erforderliche verfügbare Flugzeugtriebwerk bereits für den früheren Austausch vorgesehen ist, und ein weiteres Flugzeugtriebwerk erst beschafft werden muss.

Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung ist ein Verfahren, insbesondere ein computerimplementiertes Verfahren, zum automatisierten Erstellen eines optimierten Wartungsplans für eine Flotte von Flugzeugtriebwerken vorgesehen, wobei das Verfahren zumindest die folgenden Schritte aufweist:

a) Erfassen von Eingangsdaten zu einer Mehrzahl von Triebwerken, die für die einzelnen Flugzeugtriebwerke spezifische und/oder auf die gesamte Flotte bezogene

Informationen repräsentieren und insbesondere ein „Mean Time Between Shop Visits (MTBSV)“ oder Daten bezüglich Life limited Parts (LLP) der Triebwerke umfassen;

b) Bereitstellen eines vorhandenen Ausgangswartungsplans oder Erstellen eines Ausgangswartungsplans anhand der erfassten Eingangsdaten, insbesondere der MTBSV und oder LLP-Daten, für die Triebwerke (E1, E2, E3, E4);

c) Berechnen eines Gesamt-Wartungsaufwands für die Flotte Falle einer Anwendung des initialen Wartungsplans;

d') Optimieren des Ausgangswartungsplans mittels eines dazu trainierten selbstlernenden Algorithmus; und

f') Ausgeben eines nach Anwendung von Schritt d') optimierten Wartungsplans für die Triebwerke und/oder Ausgabedaten, die insbesondere einen geschätzten Gesamt-Wartungsaufwand des optimierten Wartungsplans umfassen. Der trainierte Algorithmus kann auf maschinellem Lernen beruhen und kann ein neuronales Netzwerk aufweisen. Der trainierte Algorithmus kann beispielsweise an manuell optimierten Datensätzen trainiert werden oder auch beruhend auf Ergebnissen des eingangs beschriebenen automatisierten iterativen Optimierungsverfahrens für Wartungspläne von Triebwerksflotten.

Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung kann der automatisierte iterative Ansatz mit dem auf maschinellem Lernen beruhenden Ansatz kombiniert werden. Hierzu kann bspw. ein automatisiert iterativ nach dem ersten Aspekt der Erfindung erstellter Wartungsplan als der Ausgangswartungsplan für ein auf maschinellem Lernen basierenden Optimierungsverfahren verwendet werden oder umgekehrt. Der automatisierte iterative Ansatz liefert einem in diesem Falle eine gute Ausgangsbasis, von der aus der auf maschinellem Lernen beruhende Algorithmus schnell zu einer weiter optimierten Lösung konvergieren kann.

In allen oben beschriebenen Ausführungsformen können die Eingangsdaten bevorzugt wenigstens ein Datensatz aus der Gruppe: mittlere Standzeit /Mean Time Between Shop Visits (MTBSV); den Zeitaufwand und/oder die Kosten (Workscope) von jeweiligen Typen von Shop Visits; Daten bezüglich Life limited Parts (LLP) der

Triebwerke (E1, E2, E3, E4), insbesondere verbleibende Zyklen der LLPs; Triebwerkstyp; austauschbare Kleinteile; Verfügbarkeit von gebrauchten und/oder neuen Ersatzteilen; Kosten von gebrauchten und/oder neuen Ersatzteilen; technische Spezifikationen der Flugzeugtriebwerke; das Zeitintervall für jedes Flugzeugtriebwerk seit der Erstzulassung oder seit dem letzten Shop Visit; die Verfügbarkeit des gleichen Typs der jeweiligen Flugzeugtriebwerke, welche für eine Wartung vorgesehen sind, repräsentieren.

Ein oder mehrere dieser Eingangsdaten können für die Erstellung des Wartungsplans verwendet werden. Andere Eingangsdaten/Eingangsgrößen können zu völlig unterschiedlichen Wartungsplänen für das jeweilige einzelne Flugzeugtriebwerk oder für die Flotte führen.

In allen oben beschriebenen Ausführungsformen können die die im Schritt f) bzw. f') ausgegebenen Ausgabedaten eine oder mehrere Datensätze aus der Gruppe: nächster Wartungszeitpunkt der Flugzeugtriebwerke; Bedarf von Ersatz- und Kurzzeitleasingtriebwerken für die nächste Wartung; Materialbedarf für die nächste Wartung; Arbeitszeitbedarf für den Gesamt-Wartungsplan; Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) für die Triebwerksflotte; Kosten pro Flugstunde für die Triebwerksflotte und/oder Cash Flow umfassen.

Die Bereitstellung wenigstens einer dieser Daten ermöglicht die konkrete Zuordnung der Flugzeugtriebwerke zu einer Maßnahme betreffend die Wartung.

In allen oben beschriebenen Ausführungsformen kann der beim Vergleichen von Ausgangswartungsplan mit dem optimierten Wartungsplan verwendete Gesamt-Wartungsaufwand den Arbeitsaufwand oder den Materialaufwand oder Gesamtkosten der Flotte repräsentieren. Bei einigen Ausführungsformen repräsentiert der Gesamt-Wartungsaufwand den Arbeitsaufwand oder den Materialaufwand. Dabei kann der Arbeitsaufwand die insgesamt anfallenden Arbeitsstunden für die Durchführung der Wartung, das für die Durchführung der

Wartung benötigte Personal oder auch die durch die Arbeitsstunden und/oder das erforderliche Material entstehenden Kosten aufweisen. Der Materialaufwand kann die benötigten Ersatzteile sowie deren logistische Bereitstellung am Ort der Wartung aufweisen. Methoden, um diese Werte aus einem Wartungsplan abzuleiten sind bspw. aus der US 8,744,864 B2 bekannt.

Gemäß einem weiter bevorzugten Aspekt der Erfindung können die Eingangsdaten qualifizierte Schätzungen zur Marktentwicklung umfassen, wie z.B. die Verfügbarkeit von Material / Ersatzteilen auf dem Markt; die Materialkosten sowie Materialkostenentwicklung oder die Verfügbarkeit und Kosten externer Ersatztriebwerke bzw. Greentime- oder Leasing-Engines. In diesem Fall kann das Verfahren dazu eingerichtet sein, automatisiert für verschiedene Szenarien optimierte Wartungspläne auszugeben. Beispielsweise für gute, neutrale und schlechte Preisentwicklung auf dem Materialmarkt.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum optimierten Warten einer Triebwerksflotte, wobei zunächst ein optimierter Wartungsplan gemäß einem der vorgenannten Aspekte erstellt oder bezogen wird und anschließend die Triebwerksflotte entsprechend dem optimierten Wartungsplan instandgehalten, repariert und/oder überholt wird.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft das automatisierte Ausführen der vorstehend beschriebenen Verfahren zum Optimieren von Wartungsplänen für Triebwerksflotten durch Computer oder andere Mittel zur Datenverarbeitung. Ein solches Mittel im Sinne der vorliegenden Erfindung kann hard- und/oder softwaretechnisch ausgebildet sein, insbesondere eine, vorzugsweise mit einem Speicher- und/oder Bussystem daten- bzw. signalverbundene, insbesondere digitale, Verarbeitungs-, insbesondere Mikroprozessoreinheit (CPU) und/oder ein oder mehrere Programme oder Programmmodule aufweisen. Die CPU kann dazu ausgebildet sein, Befehle, die als ein in einem Speichersystem abgelegtes Programm implementiert sind, abzuarbeiten, Eingangssignale von einem Datenbus zu erfassen und/oder Ausgangssignale an einen Datenbus abzugeben. Ein Speichersystem kann ein oder mehrere, insbesondere verschiedene, Speichermedien, insbesondere

optische, magnetische, Festkörper- und/oder andere nicht-flüchtige Medien aufweisen. Das Programm kann derart beschaffen sein, dass es die hier beschriebenen Verfahren verkörpert bzw. auszuführen imstande ist, sodass die CPU die Schritte solcher Verfahren ausführen kann.

Ein Computerprogrammprodukt kann in einer Ausführung ein, insbesondere nicht-flüchtiges, Speichermedium zum Speichern eines Programms bzw. mit einem darauf gespeicherten Programm aufweisen, insbesondere sein, wobei ein Ausführen dieses Programms ein System bzw. eine Steuerung, insbesondere einen Computer, dazu veranlasst, ein hier beschriebenes Verfahren bzw. einen oder mehrere seiner Schritte auszuführen.

In einer Ausführung werden ein oder mehrere, insbesondere alle, Schritte des Verfahrens vollständig oder teilweise automatisiert durchgeführt, insbesondere durch einen Computer oder eine andere Datenverarbeitungsanlage.

Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft ein Computerprogram, das konfiguriert ist, das Verfahren gemäß dem ersten Aspekt auszuführen.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum automatisierten Erstellen und Optimieren eines Wartungsplans für Flugzeugtriebwerke, wobei die Vorrichtung konfiguriert ist, das Verfahren gemäß dem ersten Aspekt auszuführen.

Weitere Vorteile, Merkmale und Anwendungsmöglichkeiten der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden detaillierten Beschreibung im Zusammenhang mit den Figuren.

Hierzu zeigt, teilweise schematisiert:

Fig. 1A eine erste Ausführung der vorliegenden Erfindung; und

Fig. 1B eine zweite Ausführung der vorliegenden Erfindung

- Fig. 1C eine dritte Ausführung der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 2A eine Darstellung eines initialen Wartungsplans;
- Fig. 2B eine Darstellung eines verbesserten Wartungsplans.

In den Figuren werden durchgängig dieselben Bezugszeichen für dieselben oder einander entsprechenden Elemente der Erfindung verwendet.

Fig. 1A zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel für ein Verfahren 100 zum automatisierten Erstellen eines optimierten Wartungsplans für eine Triebwerksflotte gemäß der vorliegenden Erfindung. Das Verfahren 100 ist im vorliegenden Beispiel computerimplementiert. Die Triebwerksflotte umfasst dabei im vorliegenden Beispiel der Anschaulichkeit halber nur Flugzeugtriebwerke E1, E2, E3, E4.

In einem ersten Schritt des Verfahrens werden Eingangsdaten 110 in einer Datenbank erfasst, welche jeweils eines oder mehrere Flugzeugtriebwerke E1, E2, E3, E4 betreffen. Die Eingangsdaten 110 können Daten zur Flugtriebwerksflotte, Kundendaten, Herstellerspezifikationen, Daten zur Wartung, Reparatur und Überholung, Daten zu Kosten und Preisentwicklungen, technische Spezifikationen der jeweiligen Flugzeugtriebwerke, oder auch Daten über Marktvorhersagen repräsentieren. Insbesondere werden Herstellerspezifikationen, wie Lebensdauer oder Wartungsstrategien der Fluglinien berücksichtigt. Darüber hinaus werden technische und kommerzielle Informationen betreffend Reparatur, Wartung und Überholung berücksichtigt.

Die allgemeinen Triebwerksdaten bzw. Daten zur Triebwerksflotte können beispielsweise eines oder mehrere Elemente aus der folgenden Liste beinhalten: Triebwerkstyp, Zeit seit der Inbetriebnahme (Time since New / TSN), Zyklen seit der Inbetriebnahme (cycle since new / CSN), Zeit seit dem letzten Shop Visit (time since last shop visit / TSLSV), Zyklen seit dem letzten Shopvisit (cycles since last shop visit / CSLSV), Zeitpunkt der Inbetriebnahme (Entry into service), Zeitpunkt der Außerbetriebnahme (phase out date / End of Life), Status der „Life Limited

Parts“ (LLPs), insbesondere verbleibende Zyklen für die einzelnen Teile, verbleibende Engine-Performanz (remaining engine performance) oder die Konfiguration des Triebwerks.

Die Herstellerspezifikationen können bspw. vorgeschriebene Life Limits auf verschiedene Teile, Vorgeschriebene Inspektionen (Mandatory Inspections), Teilenummern und Konfigurationsdaten des Triebwerks umfassen.

Kundendaten (i.d.R. eine Airline) können z.B. sein: Verfügbarkeit von Ersatztriebwerken oder –teilen; Daten über die betriebenen Flugrouten.

Daten zur Wartung, Reparatur und Überholung können insbesondere auf der technischen Erfahrung und dem Input des Betreibers des Optimierungsprogramms beruhen. Diese können bspw. umfassen: Erfahrungsgemäßer Aufwand (Workscope) bestimmter Arten von Shop Visits; Kostenentwicklung von Shop Visits; zeitliche Verfügbarkeit von Kapazitäten für Shop Visits oder die mittlere Standzeit „Mean Time Between Shop Visits“ / On Wing Time.

Qualifizierte Schätzungen zur Marktentwicklung können umfassen: Verfügbarkeit von Material / Ersatzteilen auf dem Markt; Materialkosten sowie Materialkostenentwicklung; Verfügbarkeit und Kosten externer Ersatztriebwerke bzw. Greentime- oder Leasing-Engines.

Nach dem Erfassen der Eingangsdaten 110 wird ein Ausgangswartungsplan 140 mit vorbestimmten Wartungsintervallen zwischen Shopvisits bzw. ab Inbetriebnahme für die Flugzeugtriebwerke E1, E2, E3, E4 im Rahmen einer chronologischen Vorwärtsplanung erstellt. Die vorbestimmten Wartungsintervalle können bspw. vom Kunden vorgegebenen sein oder auf einem maximalen Wartungsintervall basieren, das vom Hersteller oder gesetzlich vorgegeben ist. Alternativ könnte beispielsweise auch ein vom Kunden vorgegebener Ausgangswartungsplan 140 als Eingangsdatensatz in das Verfahren eingegeben werden oder der Ausgangswartungsplan 140 könnte auf der Grundlage anderer Eingangsdaten erstellt

werden, bspw. anhand der verbleibenden Zyklen der Life Limited Parts oder dem „Mean Time Between Shop Visits“.

Zur weiteren Optimierung dieses Ausgangswartungsplans 140, wird im Ausführungsbeispiel der Figur 1A ein automatisierter iterativer Algorithmus 120 abgefahren. In einem ersten Schritt 150 des iterativen Algorithmus 120 wird ein Wartungsaufwand nach einem vorbestimmten Kriterium für jedes der Flugzeugtriebwerke E1, E2, E3, E4 abgeschätzt und die Flugzeugtriebwerke werden anschließend nach dem erwarteten Aufwand (absteigend) sortiert. Hierdurch kann im nächsten Schritt dasjenige Triebwerk mit dem höchsten erwarteten Aufwand und somit dem höchsten vermuteten Einsparpotential zuerst betrachtet werden. Der erwartete Aufwand kann ein Wert sein, der anhand des Ausgangswartungsplans für die einzelnen Triebwerke generiert wird. Dabei können z.B. für einzelne Operationen eine Wartungsdauer, geschätzte Wartungskosten, Materialaufwände oder eine Kombination aus diesen hinterlegt sein, die dann kumuliert oder auf andere Weise in eine Kenngröße umgerechnet werden.

Im nächsten Schritt 160 wird eine vorgegebene bzw. im Programm vorprogrammiert hinterlegte Optimierungsstrategie bzw. Heuristik H1, H2, H3, H4 an dem Triebwerk (bspw. E1) mit dem höchsten erwarteten Wartungsaufwand ausgeführt. Beispielhafte Optimierungsstrategien H1, H2, H3, H4 werden an späterer Stelle genauer beschrieben. Dabei werden Wechselwirkungen auf die Wartungsplanung der anderen Triebwerke der Flotte berücksichtigt (bspw. verfügbare Ersatzteile oder Zeitfenster in der Montagehalle). Nach dem Anwenden einer oder mehrerer solcher Optimierungsstrategien auf das erste Triebwerk E1, prüft das Programm, ob sich der Gesamt-Wartungsaufwand für die Triebwerksflotte gegenüber dem Ausgangswartungsplan verringert hat und berücksichtigt dazu die jeweiligen Einzelwartungspläne der Triebwerke E1, E2, E3, E4 (vgl. Fig. 2). Hat sich der Gesamt-Wartungsaufwand verringert, werden die Änderungen an den Wartungsplänen durch die Optimierungsstrategie beibehalten und der Algorithmus fährt mit der Optimierung des nächsten Triebwerks fort. Hat sich der Gesamt-Wartungsaufwand nicht verringert oder verschlechtert, werden Änderungen an den Wartungsplänen durch die Optimierungsstrategie verworfen und der Algorithmus

wählt entweder eine andere Optimierungsstrategie $H_1, \dots, H_4$ aus oder fährt mit dem nächsten Triebwerk fort, falls keine hinterlegten Optimierungsstrategien mehr zur Verfügung stehen.

Im folgenden Schritt 170 wird eine der vorgegebenen bzw. vorprogrammierten Optimierungsstrategien $H_1, \dots, H_4$ an dem Triebwerk (bspw. E_2) mit dem zweithöchsten erwarteten Wartungsaufwand durchgerechnet, und falls sich eine weitere Verbesserung am Gesamt-Wartungsaufwand der Flotte ergibt auch angewendet, wie zu Schritt 160 bereits beschrieben. Dieses Prozedere wird der Reihe nach für jedes Triebwerk wiederholt, bis auch das letzte Triebwerk der Flotte betrachtet wurde (Schritt 180). In anderen Worten iteriert das Programm der Reihe nach für jedes Triebwerk E_1, E_2, E_3, E_4 Optimierungsstrategien durch bis sich jeweils eine Verbesserung für die gesamte Triebwerksflotte ergibt.

Im Anschluss an diesen Iterationsdurchlauf in den Schritten 160-180 wird im Schritt 190 auf Basis eines Vergleichs der erreichten Optimierung mit einer vordefinierten Randbedingung (bspw. eine vordefinierte Anzahl an Iterationszyklen oder eine Vorbestimmte gewünschte prozentuale Aufwandsreduktion) entschieden, ob noch eine weitere Iteration durchgeführt wird. Wenn eine weitere Iteration durchgeführt werden soll, wird eine aktualisierte Sortierung 150 der Flugzeugtriebwerke auf Basis des erwarteten Aufwands je Triebwerk E_1, E_2, E_3, E_4 durchgeführt, d.h. die Triebwerke werden wieder absteigend nach Aufwand/Kosten sortiert. Anschließend werden die Triebwerke nochmals wie vorstehend beschrieben der Reihe nach iterativ optimiert.

Im Falle, dass der Vergleich 190 ergibt, dass keine weitere Iteration erfolgen soll, werden die Ausgangsdaten 130 ausgegeben. Abbruchkriterien könnten beispielsweise sein, dass eine Zielloptimierung erreicht wurde oder dass in den letzten x Iterationszyklen keine Verbesserung mehr erreicht wurde.

Die Ausgangsdaten können Vorhersagen über geplante Wartungstermine, Vorhersagen über benötigtes Material, sowie Vorhersagen über die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership) repräsentieren. Methoden, um

solche Kenndaten bzw. Ausgangsdaten aus einem Wartungsplan zu erzeugen, sind dem Fachmann bspw. aus der US 8,744,864 A bekannt.

Zusammengefasst wird bei der iterativen Optimierung ein initialer Wartungsplan iterativ optimiert. Dabei wird zunächst ein der jeweiligen Iteration zugeordneter Wartungsplan definiert. In jeder Iteration werden die Triebwerke in eine bestimmte Sequenz sortiert und nacheinander nach einer vorbestimmten Optimierungsstrategie bearbeitet. Hieraus kann eine Modifikation hinsichtlich der Art oder des Zeitpunkts der vorzunehmenden Wartungsmaßnahmen bezüglich der einzelnen Flugzeugtriebwerke erfolgen, falls eine Verbesserung durch Anwendung der Optimierungsstrategie erkannt wird. Die Modifikation der Art der Wartungsmaßnahme kann hierbei beispielsweise die Änderung von einer Reparatur eines Teils eines Flugzeugtriebwerks, welches in der vorherigen Iteration vorgesehen war, zu einem Austausch des Teils mit einem Ersatzteil für die aktuelle Iteration bedeuten.

Für weitere Verbesserungen des Optimierungsverfahrens kann zwischen einer automatisierten iterativen Bearbeitung, wie vorstehend beschrieben, und einem Algorithmus, welcher auf künstlicher Intelligenz basiert, gewählt werden, siehe Fig. 1B.

Fig. 1B zeigt eine zweite Ausführung der vorliegenden Erfindung. Während der automatischen iterativen Bearbeitung gemäß Fig. 1A, steigt mit der Anzahl der Triebwerke der Flotte die Anzahl an möglichen Planungsstrategien sehr schnell sehr stark an, sodass nicht alle Optionen explizit durchgerechnet werden können. Daher ist alternativ oder ergänzend zu der automatisierten iterativen Bearbeitung ein Verfahren, welches auf künstlicher Intelligenz (KI) basiert 210, vorgesehen. Dabei werden die vorstehend beschriebenen Eingangsdaten 110 mittels eines trainierten selbstlernenden Algorithmus bearbeitet, beispielsweise ein baumbasierter Algorithmus, um daraus Ausgangsdaten 220 basierend auf KI zu generieren. Der Algorithmus kann beispielsweise manuell trainiert werden, indem er mit den Eingangsdaten und den jeweils zugehörigen optimierten Wartungsplänen und Ausgangsdatensätzen gefüttert wird, die von einem erfahrenen Wartungsplaner

erstellt wurden. Alternativ kann er auch anhand vorhandener Datensätze aus dem vorstehend beschriebenen iterativen automatischen Optimierungsprozess gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel trainiert werden. Dabei lernt der Algorithmus welche Entscheidungen (Welche Optimierungsstrategien H1, H2, etc.) in welchen Situationen vielversprechender sind als andere, und nutzt diese bevorzugt. Die Bearbeitung durch KI kann durch einen Benutzer aktiviert oder deaktiviert werden.

Fig. 1C zeigt eine dritte Ausführung der vorliegenden Erfindung. Hierbei ist schematisch ein Verfahren mit automatisierter iterativer Bearbeitung und KI zur Erstellung eines Wartungsplans dargestellt. Dabei werden die Eingangsdaten 110 nacheinander durch den automatisierten iterativen Algorithmus 120 und KI-basierten Algorithmus 210 bearbeitet. Es ist auch denkbar, dass zunächst eine Bearbeitung durch den KI-basierten Algorithmus 210 erfolgt, und im Anschluss eine Bearbeitung durch den automatisierten iterativen Algorithmus 120 erfolgt. Hieraus werden Ausgangsdaten 220, 310 generiert. Es ist auch denkbar, die Intensität, mit welcher der KI-basierte Algorithmus Strategien H1, H2, etc. verfolgt, einzustellen, oder Strategien, welche verfolgt werden sollen, vorzugeben, beispielsweise durch einen Benutzer. Die Verwendung beider Algorithmen, also automatisiert iterativ und KI-basiert, ist bei besonders anspruchsvollen Modellen, welche viel Rechenleistung erfordern, vorteilhaft.

Durch die beschriebenen Verfahren in den Figuren 1A, 1B und 1C wird es auch ermöglicht, aus verschiedenen einsetzbaren Planungsstrategien die geeignete für die Erstellung eines Wartungsplans einer Flugzeugtriebwerksflotte auszuwählen. Dazu zählen die Anpassung der durchschnittlichen Zeit zwischen Wartungsterminen, die Zuweisungen von lebensdauerbegrenzten Ersatzteilen (LLPs), und die Verwendung von neuen oder bereits benutzten Flugzeugtriebwerken von innerhalb des Betriebs oder von einer externen Firma. Zusätzlich können unterschiedliche Bedingungen und/oder Einschränkungen, welche spezifisch zu einer jeweiligen Flugzeugtriebwerksflotte zuordenbar sind, definiert werden. Ebenso können Auslaufszszenarien und Bedingungen für die Optimierung definiert und angepasst werden.

Unter Berücksichtigung aller Eingangsdaten und Randbedingungen kann eine Vorhersage für einen Wartungstermin bestimmt werden, wobei die Gesamtbetriebskosten für jedes einzelne Flugzeugtriebwerk und die Flugzeugtriebwerksflotte minimiert werden können.

Fig. 2A zeigt eine beispielhafte Darstellung eines Ausgangswartungsplans 400. Hierbei sind für vier Flugzeugtriebwerke E1, E2, E3, E4 die erforderlichen Shop Visits jeweils auf einer Zeitachse zwischen einem Startzeitpunkt t_1 und einem Endzeitpunkt t_2 bzw. t_3 , welcher das Ende des Lebenszyklus (EOL) des jeweiligen Flugzeugtriebwerks sein kann, dargestellt. Im gezeigten Beispiel haben die Triebwerke E1 und E2 den Zeitpunkt t_2 als Ende ihres Lebenszyklus und die Triebwerke E3 und E4 den späteren Zeitpunkt t_3 .

Der jeweilige Status der Triebwerke zu einem aufgeplanten Shop Visit ist in dem Format Ex-Sy angegeben, wobei „x“ die Nummer des Flugzeugtriebwerks repräsentiert, und „y“ eine fortlaufende Nummer für den jeweiligen Shop Visit darstellt. Demnach steht E1-S2 für den Status des Flugzeugtriebwerks 1 zum zweiten Shop Visit im erstellten Ausgangswartungsplan 140.

Weiterhin sind die Shop Visits mit einem Triebwerks-Symbol gekennzeichnet, die den Arbeitsumfang (Workscope) der jeweiligen Shop Visits symbolisieren. Ohne weitere Kennzeichnung steht das Symbol für eine Performance Restoration (Leistungswiederherstellung) wie beispielsweise in E1-S1, Fig. 2A gezeigt. Dies kann eine weniger aufwendige Wartungsoperation sein, bei der keine Teile getauscht werden müssen, sondern lediglich kleinere Tätigkeiten anfallen, bspw. das Restaurieren von Schaufelkanten. Ist das Symbol in ein Quadrat eingefasst, handelt es sich um einen Shop Visit, bei dem lebensdauerbegrenzte Teile (LLPs) durch Neuteile ersetzt werden müssen (oder bald ersetzt werden müssen), siehe beispielsweise E1-S2, Fig. 2A, dies ist aufgrund von Materialkosten und Arbeitsaufwand eine aufwendigere Maßnahme als die Performance Restoration. Ist das Symbol in einen gestrichelten Kreis eingefasst, ist darunter ein Shop Visit zu verstehen, bei dem lebensdauerbegrenzte Teile (LLPs) durch gebrauchte Teile ersetzt werden, siehe beispielsweise E1-S2, Fig. 2B.

Die Abstände zwischen den einzelnen Shopvisits eines Flugzeugtriebwerks symbolisieren den zeitlichen Abstand zum nächsten Wartungstermin. Auf diese Weise können die zeitlichen Intervalle von verschiedenen Flugzeugtriebwerken verglichen werden, sowie die Sequenz, in welche diese zur Wartung in den Shop müssen.

Fig. 2B zeigt eine beispielhafte Darstellung eines mittels eines Verfahrens gemäß eines Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung verbesserten Wartungsplans 500. An diesem Beispiel sollen im Folgenden beispielhafte Optimierungsstrategien, die im Rahmen eines der oben genannten Verfahren zum Einsatz kommen können, erläutert werden.

Hierbei soll u.a. verdeutlicht werden, wie unterschiedliche Planungsstrategien kombiniert werden können, um eine Triebwerksflotte hinsichtlich des Erwarteten Wartungsaufwands oder der Gesamtbetriebskosten zu optimieren.

Die Triebwerke der Flotte wurden gemäß dem vorstehend beschriebenen Schritt 150 absteigend (E1-E4) nach geschätztem Wartungsaufwand bzw. Wartungskosten sortiert. Der automatisierte iterative Algorithmus beginnt damit, eine geeignete Optimierungsstrategie für Triebwerk E1 zu suchen.

Eine erste Planungsstrategie oder Heuristik H1, die angewandt wird, überprüft für die aufwendigere Kategorie von Shop Visits, bei der gemäß Herstellervorgaben lebensdauerbegrenzte Teile (LLPs) durch Neuteile ersetzt werden sollen, ob die passenden LLPs mit ausreichender Restlebensdauer in einem der anderen Triebwerke der Flotte zu finden sind. Im vorliegenden Beispiel ist im Ausgangswartungsplan 400 für die Shop Visits E1-S2, E2-S2, E3-S3, E3-S3 und E4-S1 ein solches Ersetzen von LLPs durch Neuteile vorgesehen. Der Algorithmus stellt dabei, dass im Triebwerk E2 zu einem geeigneten Zeitpunkt LLPs mit ausreichend Restzyklen vorhanden sind, die im Triebwerk E1 für den Shop Visit E1-S2 verwendet werden können, da nur noch wenige Restzyklen auf den entsprechenden Bauteilen des Triebwerks E1 übrig sind. Durch den Übertrag dieser in der Triebwerksflotte vorhandenen gebrauchten LLPs von Triebwerk E2 auf Triebwerk E1 (gestrichelte schräge Linie im

Wartungsplan 500), kann das Triebwerk E1 ohne die Verwendung zusätzlicher Neuteile bis zu seiner geplanten Außerbetriebnahme (EOL) zum Zeitpunkt t2 weiter betrieben werden. Nach Anwendung dieser Strategie prüft das Programm, ob sich durch die Maßnahme der Gesamt-Wartungsaufwand verringert hat. Da diese Prüfung positiv ausfällt, wird mit dem zweiten Triebwerk E2 fortgefahren.

Das Programm sieht am Triebwerk E2 keine Anwendbarkeit für Optimierungsstrategie H1 und prüft deshalb zweite Planungsstrategie H2. Diese Optimierungsstrategie überprüft der Reihe nach für alle Triebwerke E1, E2, E3, E4 für jeden Shop Visit, bei dem gemäß Herstellervorgaben lebensdauerbegrenzte Teile (LLPs) durch Neuteile ersetzt werden sollen, ob passende LLPs mit ausreichender Restlebensdauer auf dem freien Markt gebraucht bezogen werden können und zu welchem Preis dies möglich ist. Im vorliegenden Beispiel wird durch diese Strategie festgestellt, dass im Shop Visit E2-S2 auf Neuteile verzichtet werden kann, indem gebrauchte LLPs vom Markt bezogen werden. Da sich dadurch eine Gesamtverbesserung der Kosten ergibt, wird diese Optimierung übernommen. Ebenso erkennt die Strategie, dass für Shop Visit E3-S1 auf Neuteile verzichtet werden kann, indem gebrauchte LLPs vom Markt bezogen werden.

Bei Triebwerk E3 stellt das Programm fest, dass noch eine dritte Planungsstrategie H3 angewandt werden könnte. Strategie H3 überprüft der Reihe ob auf einen Shop Visit, bei dem lebensdauerbegrenzte Teile (LLPs) durch Neuteile ersetzt werden sollen, verzichtet werden kann, indem der Umfang der Wartungsarbeiten (Workscope) des vorangehenden Shop Visits erhöht wird. Für das Triebwerk E3 stellt der Algorithmus anhand dieser Strategie fest, dass durch frühzeitiges Ersetzen einiger LLPs durch Gebrauchtteile in besserem Zustand im vorangehenden Shop Visit E3-S2 im letzten angesetzten Shop Visit E3-S3 eine weniger aufwändige „Performance restoration“ ausreicht, um bis zur Außerbetriebnahme von E3 zum Zeitpunkt t3 durchzukommen. Dadurch wird vermieden, kurz vor Ausserbetriebnahme EOL des Triebwerks E3 neue Teile beziehen zu müssen und dadurch deren Lebenszyklen zu „verschwenden“. Auch in der Gesamtbetrachtung der Flotte ergibt sich eine Verbesserung und diese Änderung wird deshalb angewandt.

Für Triebwerk E4 kann das Programm keine Einzeloptimierung finden, die den Aufwand auf die Gesamtflotte betrachtet noch weiter senkt. Eine Iterationsschleife ist somit abgeschlossen.

Nach dieser Iterationsschleife wendet das Programm ein einer zweiten Iterationsschleife eine vierte Planungsstrategie H4 an. Diese überprüft der Reihe nach für alle Triebwerke E1, E2, E3, E4, ob auf Shop Visits, die kurz vor der Außerbetriebnahme eines Triebwerks anstehen, verzichtet werden kann. Diese Strategie stellt fest, dass die Gesamtkosten reduziert werden können, indem anstelle des Shop Visits E2-S3 das Triebwerk E2 schneller außer Betrieb genommen wird und ein Ersatztriebwerk (Triebwerkssymbol mit geschlossenem Kreis in Fig. 2B) für die kurze Restlaufzeit an dieser Stelle zum Einsatz kommt (hierzu kann bspw. aus den Eingangsdaten abgefragt werden, ob ein Ersatztriebwerk in der Triebwerksflotte bereitsteht; alternativ kann verglichen werden, ob in der Eingangsdatenbank hinterlegte Leasingkosten für ein externes Triebwerk geringer sind als geschätzte Kosten für eine Performance Restoration).

Obwohl in der vorhergehenden Beschreibung exemplarische Ausführungen erläutert wurden, sei darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl von Abwandlungen möglich ist. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den exemplarischen Ausführungen lediglich um Beispiele handelt, die den Schutzbereich, die Anwendungen und den Aufbau in keiner Weise einschränken sollen. Vielmehr wird dem Fachmann durch die vorausgehende Beschreibung ein Leitfaden für die Umsetzung von mindestens einer exemplarischen Ausführung gegeben, wobei diverse Änderungen, insbesondere in Hinblick auf die Funktion und Anordnung der beschriebenen Bestandteile, vorgenommen werden können, ohne den Schutzbereich zu verlassen, wie er sich aus den Ansprüchen und diesen äquivalenten Merkmalskombinationen ergibt.

Bezugszeichenliste

- 100 Verfahren mit einem automatisierten iterativen Algorithmus
- 110 Eingangsdaten
- 120 Automatisierter iterativer Algorithmus
- 130 Ausgangsdaten
- 140 Vorwärtsplanung
- 150 Sortierung der Flugzeugtriebwerke
- 160 Optimierung eines ersten Flugzeugtriebwerks
- 170 Optimierung eines zweiten Flugzeugtriebwerks
- 180 Optimierung eines weiteren Flugzeugtriebwerks

- 200 Verfahren basierend auf künstlicher Intelligenz
- 210 Algorithmus basierend auf künstlicher Intelligenz
- 220 Ausgangsdaten basierend auf künstlicher Intelligenz

- 300 Verfahren mit einem automatisierten iterativen Algorithmus und mit künstlicher Intelligenz
- 310 Ausgangsdaten basierend auf kombinierten Algorithmen

- 400 Initialer Wartungsplan

- 500 Optimierter Wartungsplan

- E1-E4 Jeweilige Flugzeugtriebwerke
- t1, t2, t3 Zeitpunkte betreffend den Status der jeweiligen Flugzeugtriebwerke
- E1-S1 bis E4-S3 Jeweiliger Status des jeweiligen Flugzeugtriebwerks
- H1-H4 Optimierungsstrategien / Heuristiken

Patentansprüche

1. Verfahren, insbesondere computerimplementiertes Verfahren, zum automatisierten Erstellen eines optimierten Wartungsplans für eine Flotte von Flugzeugtriebwerken, wobei das Verfahren zumindest die folgenden Schritte aufweist:

- a) Erfassen von Eingangsdaten (110) zu einer Mehrzahl von Triebwerken (E1, E2, E3, E4), die insbesondere eine mittlere Standzeit („Mean Time Between Shop Visits (MTBSV)“) oder Daten bezüglich lebenszeitbegrenzter Bauteile (LLP) der Triebwerke (E1, E2, E3, E4) umfassen;
- b) Bereitstellen eines vorhandenen Ausgangswartungsplans (140) oder Erstellen eines Ausgangswartungsplans (140) anhand der erfassten Eingangsdaten (110), insbesondere der MTBSV und oder LLP-Daten, für die Triebwerke (E1, E2, E3, E4);
- c) Bestimmen eines Gesamt-Wartungsaufwands für die Flotte Falle einer Anwendung des initialen Wartungsplans;
- d) Sortieren der Triebwerke in eine definierte Reihenfolge nach zumindest einem Kriterium, insbesondere nach einem geschätzten Wartungsaufwand oder geschätzten Wartungskosten;
- e) Anwenden zumindest einer Optimierungsstrategie oder Heuristik (H1, H2, H3, H4), die insbesondere als Algorithmus in einem Computerprogramm hinterlegt ist, auf die Triebwerke (E1, E2, E3, E4) in der definierten Reihenfolge; und
- f) Ausgeben eines nach Anwendung von Schritt e) optimierten Wartungsplans für die Triebwerke (E1, E2, E3, E4) und/oder Ausgabedaten (130), die insbesondere einen geschätzten Gesamt-Wartungsaufwand des optimierten Wartungsplans umfassen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in Schritt e) bei jeder Anwendung einer Optimierungsstrategie (H1, H2, H3, H4) auf einen Einzelwartungsplan eines Triebwerks (E1, E2, E3, E4), die Einflüsse auf die anderen Wartungspläne bestimmt werden und die durch die Optimierungsstrategie vorgenommenen Änderungen nur dann übernommen werden, wenn sich dadurch der Gesamt-Wartungsaufwand für die Triebwerksflotte verringert.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 wobei in Schritt f) neben dem optimierten Wartungsplan auch Ausgabedaten, insbesondere ein geschätzter Gesamt-Wartungsaufwand für die Triebwerksflotte, ausgegeben werden und die Schritte e) und f) so lange iteriert werden, bis anhand der Ausgabedaten ein vorbestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 3, vor jeder Iteration der Schritte e) und f) die Triebwerke (E1, E2, E3, E4) erneut gemäß Schritt d) nach dem zumindest einen Kriterium neu sortiert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, wobei bei jeder Iteration eine andere Optimierungsstrategie oder Heuristik (H1, H2, H3, H4) angewandt wird.

6. Verfahren, insbesondere computerimplementiertes Verfahren, zum automatisierten Erstellen eines optimierten Wartungsplans für eine Flotte von Flugzeugtriebwerken, wobei das Verfahren zumindest die folgenden Schritte aufweist:

a) Erfassen von Eingangsdaten (110) zu einer Mehrzahl von Triebwerken E1, E2, E3, E4, die insbesondere eine mittlere Standzeit („Mean Time Between Shop Visits (MTBSV)“) oder Daten bezüglich lebenszeitbegrenzter Bauteile (LLP) der Triebwerke (E1, E2, E3, E4) umfassen;

b) Bereitstellen eines vorhandenen Ausgangswartungsplans (140) oder Erstellen eines Ausgangswartungsplans (140) anhand der erfassten Eingangsdaten (110), insbesondere der MTBSV und oder LLP-Daten, für die Triebwerke (E1, E2, E3, E4);

c) Bestimmen eines Gesamt-Wartungsaufwands für die Flotte Falle einer Anwendung des initialen Wartungsplans;

d') Optimieren des Ausgangswartungsplans (140) mittels eines dazu trainierten selbstlernenden Algorithmus; und

f') Ausgeben eines nach Anwendung von Schritt d') optimierten Wartungsplans für die Triebwerke (E1, E2, E3, E4) und/oder Ausgabedaten (130), die insbesondere

einen geschätzten Gesamt-Wartungsaufwand des optimierten Wartungsplans umfassen.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei der Ausgangswartungsplan (110) nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5 erstellt wurde.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Eingangsdaten (110) wenigstens ein Datensatz aus der Gruppe:
Mean Time Between Shop Visits (MTBSV);
Den Zeitaufwand und/oder die Kosten (Workscope) von jeweiligen Typen von Shop Visits;
Daten bezüglich Life limited Parts (LLP) der Triebwerke (E1, E2, E3, E4), insbesondere verbleibende Zyklen der LLPs;
Triebwerkstyp;
Verfügbarkeit von gebrauchten und/oder neuen Ersatzteilen;
Kosten von gebrauchten und/oder neuen Ersatzteilen;
technische Spezifikationen der Flugzeugtriebwerke;
das Zeitintervall für jedes Flugzeugtriebwerk seit der Erstzulassung oder seit dem letzten Shop Visit;
die Verfügbarkeit des gleichen Typs der jeweiligen Flugzeugtriebwerke, welche für eine Wartung vorgesehen sind, repräsentieren.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die im Schritt f) bzw. f') ausgegebenen Ausgabedaten (130) eine oder mehrere Datensätze aus der Gruppe:
nächster Wartungszeitpunkt der Flugzeugtriebwerke;
Bedarf von Ersatz- und Kurzzeitleasingtriebwerken für die nächste Wartung;
Materialbedarf für die nächste Wartung;
Arbeitszeitbedarf für den GesamtWartungsplan;
Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) für die Triebwerksflotte;
Kosten pro Flugstunde für die Triebwerksflotte;

Cash Flow;
umfassen.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Gesamtwartungsaufwand den Arbeitsaufwand oder den Materialaufwand oder Gesamtkosten der Flotte repräsentiert.
11. Verfahren zum optimierten Warten einer Triebwerksflotte, wobei zunächst ein optimierter Wartungsplan gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10 erstellt oder bezogen wird und anschließend die Triebwerksflotte entsprechend dem Wartungsplan instandgehalten, repariert und/oder überholt wird.
12. Computerprogramm, das konfiguriert ist, das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9 auszuführen.
13. Vorrichtung zum automatisierten Erstellen und Optimieren eines Wartungsplans für Flugzeugtriebwerke, wobei die Vorrichtung konfiguriert ist, das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9 auszuführen.