

Projekt

Wartungskosten von Passagierflugzeugen bei verschiedener Triebwerksanzahl berechnet nach DOC-Methoden

Verfasser: Niklas Brüge
Felix Kranich

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME
Abgabe: 30.04.2018

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

URN:

<http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:18302-aero2018-04-30.011>

Associated URLs: <http://nbn-resolving.org/html/urn:nbn:de:gbv:18302-aero2018-04-30.011>

© This work is protected by copyright

The work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0

International License: CC BY-NC-SA

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>



Any further request may be directed to:

Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME

E-Mail see: <http://www.ProfScholz.de>

This work is part of:

Digital Library - Projects & Theses - Prof. Dr. Scholz

<http://library.ProfScholz.de>

Published by

Aircraft Design and Systems Group (AERO)

Department of Automotive and Aeronautical Engineering

Hamburg University of Applied Science

This report is deposited and archived:

- Deutsche Nationalbibliothek (<http://www.dnb.de>)
- Repositorium der Leibniz Universität Hannover (<http://www.repo.uni-hannover.de>)

This report has associated published data in Harvard Dataverse:

<https://doi.org/10.7910/DVN/5O7CSB>

Kurzreferat

Diese Projektarbeit versucht zu erklären, warum Flugzeuge mit drei oder vier Triebwerken kaum noch verkauft werden. Dabei wird insbesondere der Vermutung nachgegangen, dass Flugzeuge mit einer größeren Anzahl an Triebwerken höhere Wartungskosten haben könnten. Zur Beantwortung der Frage werden sechs verschiedene Methoden zur Berechnung von Betriebskosten (Direct Operating Costs, DOC) von Passagierflugzeugen herangezogen, die u.a. auch die Kosten der Triebwerkswartung abschätzen. Vier dieser DOC-Methoden sind von Organisationen: Air Transport Association of America (ATA 1967), Deutsche Lufthansa (DLH 1982), Association of European Airlines (AEA 1989), Airbus Industrie (AI 1989). Zwei DOC-Methoden wurden an Universitäten entwickelt und sind von Jenkinson bzw. von Thorbeck (TU Berlin, TUB). Weiterhin werden grundsätzliche flugmechanische Überlegungen angestellt und die Literatur durchgesehen, die aber nur wenige Hinweise zur Beantwortung der Fragestellung enthält. Die Gleichungen zur Berechnung der Triebwerkswartungskosten aller sechs Methoden werden dargelegt und erklärt. Die Methoden unterscheiden sich stark in ihrer Komplexität. Da die Methoden sich auf unterschiedliche Jahre beziehen werden die Kosten mit einem Inflationsfaktor auf das Jahr 2017 umgerechnet und somit vergleichbar gemacht. Zum Vergleich werden weiterhin die Gleichungen zur Berechnung der Wartungskosten der Flugzeugzelle angegeben. Zur Berechnung der Triebwerkswartungskosten wurden vier in der Größe vergleichbare Mittelstreckenflugzeuge ausgewählt: B737-800, A318 (zwei Triebwerke), Jak-42 (drei Triebwerke), BAE 146-300 (vier Triebwerke). Weiterhin wurden vier in der Größe vergleichbare Langstreckenflugzeuge ausgewählt: A330-300 (zwei Triebwerke), MD11-ER, TriStar (drei Triebwerke), A340-300 (vier Triebwerke). Zum Vergleich eignen sich besonders der A330 und der A340 da die Technik, das Alter und die Abmaße sehr eng bei einander liegen. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass sich die Aufteilung der Wartungskosten zwischen Zelle und Triebwerken uneinheitlich zeigt. Die AI-Methode ergibt im Vergleich viel zu hohe Triebwerkskosten. Der Grund dafür ist die direkte Multiplikation von Schub mit den Lohnkosten. Die AI-Methode muss daher bei der Endanalyse unberücksichtigt bleiben. Bei den Mittelstreckenflugzeugen lieferten die Methoden nach AEA, DLH und TUB ähnliche Ergebnisse. Bei den Langstreckenflugzeugen lieferten die AEA-Methode, DLH-Methode und die Methode nach Jenkinson ähnliche Ergebnisse. Empfohlen werden kann damit eine Berechnung mit der AEA-Methode, die auch öffentlich ist. Für einen Endvergleich wurden für die Mittel- bzw. Langstrecke zu jeder Triebwerksanzahl nur jeweils ein Flugzeug einbezogen. Mit dieser bereinigten Auswahl bei Flugzeugen und Methoden ergab sich für die Mittelstrecke eine leichte Abnahme der Triebwerkswartungskosten mit der Triebwerksanzahl von nur 6,1 US\$ pro Flugstunde pro Triebwerk (Zunahme von -6,1 US\$/FH/Triebwerk). Für die Langstrecke ergab sich eine leichte Zunahme der Triebwerkswartungskosten mit der Triebwerksanzahl von nur 32,5 US\$ pro Flugstunde pro Triebwerk. Damit konnte die eingangs genannte Vermutung über eine Zunahme der Triebwerkswartungskosten mit der Anzahl der Triebwerke nur zum Teil bestätigt werden. Die Analyse zeigte, dass die Triebwerkswartungskosten von

vielen Parametern abhängen, die Triebwerksanzahl ist nur ein Parameter von vielen. Selbst ähnliche Flugzeuge liefern bei gleicher Triebwerkszahl daher Triebwerkswartungskosten, die sich stark unterscheiden und die Abhängigkeit von der Triebwerkszahl wenig sichtbar werden lassen. Es werden Vorschläge gemacht, welche anderen methodischen Ansätze hier Abhilfe schaffen könnten.

Wartungskosten von Passagierflugzeugen bei verschiedener Triebwerksanzahl berechnet nach DOC-Methoden

Aufgabenstellung für ein Projekt

Hintergrund

Beim Entwurf von Passagierflugzeugen wird der benötigte Schub ermittelt, der auf 2, 3 oder 4 Triebwerke aufgeteilt werden kann. Eine Zulassung nach CS-25 fordert mindestens zwei Triebwerke. Wir sehen heute, dass Entwürfe mit 3 oder 4 Triebwerken am Markt kaum noch eine Chance haben. Woran liegt das? Es handelt sich um eine Fragestellung, die den Flugzeugentwurf ganzheitlich betrifft (spezifischer Kraftstoffverbrauch, Nullwiderstand der Triebwerksgondeln, Masse der Triebwerke, ...). Als ein Hauptgrund für den Trend zu zwei Triebwerken werden jedoch oft die Wartungskosten der Triebwerke genannt, die bei mehreren kleinen Triebwerken höher sein sollen als bei zwei großen Triebwerken. Diese Arbeit legt daher den Schwerpunkt auf die Wartungskosten und geht der Vermutung steigender Triebwerkswartungskosten bei höherer Triebwerkszahl auf den Grund. Statistiken zu Wartungskosten kann man öffentlich zugänglich nicht erwarten. DOC-Methoden enthalten aber recht einfache Formeln zur Abschätzung der Triebwerkswartungskosten und können ausgewertet werden. Die DOC-Methoden sind bekannt unter der Abkürzung der herausgebenden Organisation und der Jahreszahl der Veröffentlichung: ATA 1967, AA 1980, DLH 1982, AEA 1989, AI 1989. Weiterhin stehen die Methoden von Jenkinson und Thorbeck (TUB) zur Verfügung. Aktuell werden Flugzeugentwürfe mit verteilten Antrieben (distributed propulsion) diskutiert. Hierbei kommen eine sehr hohe Anzahl von Triebwerken zum Einsatz (durchaus 20 oder mehr). Dies mögen dann elektrische Antriebe sein. Laufen Vorschläge mit vielen Triebwerken dem beobachteten Trend zu nur zwei Triebwerken entgegen? Welche Gründe mögen für dieses Umdenken sprechen?

AA	American Airlines
AEA	Association of European Airlines
AI	Airbus Industrie
ATA	Air Transport Association of America

DLH	Deutsche Lufthansa
DOC	Direct Operating Costs
TUB	TU Berlin

Aufgabe

Berechnen Sie die Triebwerkswartungskosten nach DOC-Methoden für ausgewählte Flugzeuge mit unterschiedlicher Anzahl von Triebwerken (2, 3, oder 4) und stellen Sie grundsätzliche Überlegungen an zur Situation bei deutlich mehr Triebwerken. Die folgenden Teilaufgaben sind dabei zu bearbeiten:

- Analyse der aktuellen Marktsituation bezüglich der Nettobestellung von Flugzeugen mit verschiedener Anzahl an Triebwerken.
- Vergleich von Passagierflugzeugen mit unterschiedlicher Anzahl an Triebwerken.
- Betrachtung der Schubanforderungen und Schubsteigerung in Abhängigkeit der Triebwerksanzahl
- Beschreibung der DOC-Methoden insbesondere mit dem Teilgebiet der Wartungskosten.
- Auswahl der Formeln zur Berechnung der Wartungskosten und Anpassung der Formeln an aktuelle Verhältnisse.
- Auswahl geeigneter Flugzeuge zur Anwenden der Formeln und zum Vergleichen untereinander.
- Erstellung einer Excel-Anwendung zur flexiblen Berechnung und Darstellung der Wartungskosten.
- Vergleich der DOC-Methoden untereinander.
- Identifizieren von Fehlerquellen in der Berechnung und Zusammenfassung der Aussagen.
- Auswirkungen einer hohen Triebwerksanzahl auf den Flugzeugentwurf.

Die Ergebnisse der Hausarbeit sollen in einem Bericht dokumentiert werden. Es sind die DIN-Normen zur Erstellung technisch-wissenschaftlicher Berichte zu beachten.

Inhalt

	Seite
Verzeichnis der Bilder	8
Verzeichnis der Tabellen	10
Liste der Symbole	11
Liste der Abkürzungen	13
Verzeichnis der Begriffe und Definitionen	15
1 Einleitung	17
1.1 Motivation.....	17
1.2 Begriffsdefinitionen.....	18
1.3 Ziel der Arbeit.....	19
1.4 Literaturübersicht.....	20
1.5 Aufbau der Arbeit.....	21
2 Grundlagen	22
2.1 Aktuelle Marktsituation	22
2.2 Betrachtung gängiger Triebwerkskonfigurationen	23
2.3 Schubanforderung an das Flugzeug.....	26
2.4 Möglichkeiten der Schuboptimierung	28
2.4.1 Folgen der Steigerung des Bypassverhältnisses	29
2.4.2 Folgen der Steigerung der Turbineneintrittstemperatur	29
2.4.3 Komponentenwirkungsgrade in Abhängigkeit der Triebwerksgröße.....	31
2.5 Einführung in die Betriebskosten	34
2.6 Definition der Wartungskosten.....	35
3 Zu vergleichende zivile Passagierflugzeuge	37
4 Wartungskosten nach DOC-Methoden	41
4.1 Berechnung nach der AEA-Methode.....	44
4.1.1 Herleitung der Berechnung nach der AEA-Methode	44
4.1.2 Ergebnisse der AEA-Methode.....	45
4.1.3 Auswertung der Ergebnisse der AEA-Methode	49
4.2 Berechnung nach Jenkinson	49
4.2.1 Herleitung der Berechnung nach Jenkinson	49
4.2.2 Ergebnisse nach Jenkinson	51
4.2.3 Auswertung der Ergebnisse der Methode nach Jenkinson	53
4.3 Berechnung nach der TUB-Methode.....	54
4.3.1 Herleitung der Berechnung nach der TUB-Methode.....	54
4.3.2 Ergebnisse der TUB-Methode	56
4.3.3 Auswertung der Ergebnisse der TUB-Methode	58

4.4	Berechnung nach der ATA67-Methode.....	59
4.4.1	Herleitung der Berechnung nach der ATA67-Methode	59
4.4.2	Ergebnisse der ATA67-Methode.....	61
4.4.3	Auswertung der Ergebnisse der ATA67-Methode	63
4.5	Berechnung nach der DLH-Methode.....	64
4.5.1	Herleitung der Berechnung nach der DLH-Methode	64
4.5.2	Ergebnisse der DLH-Methode.....	68
4.5.3	Auswertung der Ergebnisse der DLH-Methode	70
4.6	Berechnung nach der AI-Methode.....	71
4.6.1	Herleitung der Berechnung nach der AI-Methode	71
4.6.2	Ergebnisse der AI-Methode.....	75
4.6.3	Auswertung der Ergebnisse der AI-Methode	77
5	Auswertung der DOC-Methoden	78
5.1	Vergleich der DOC-Methoden	78
5.1.1	Betrachtung der Triebwerkswartungskosten	78
5.1.2	Betrachtung anteiligen Wartungskosten für die Langstrecke.....	82
5.1.3	Betrachtung anteiligen Wartungskosten für die Mittelstrecke	86
5.2	Kritische Methodenbetrachtung.....	90
5.3	Trendbetrachtung der Triebwerkswartungskosten	94
6	Betrachtung erweiterter Triebwerkskonfiguration.....	96
6.1	Distributed Propulsion	96
6.1.1	Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Triebwerksanzahl.....	96
6.1.2	Schub-Gewichtsverhältnisverhalten bei Ausfall eines zweiten Triebwerkes.....	97
6.1.3	Operationelle Aspekte	99
7	Zusammenfassung	102
8	Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	107

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1	Nettobestellungen von Zwei- und Vierstrahlern von 2006-2016	22
Bild 2.2	Kräftebilanz bei Ausfall des kritischen Triebwerks eines Vierstrahlers	23
Bild 2.3	Auftriebsbeeinflussung durch Installation eines Triebwerks unter dem Flügel	24
Bild 2.4	Typische Zweistrahlerekonfiguration (Airbus A330)	24
Bild 2.5	Typische Dreistrahlerekonfiguration (MD-11)	25
Bild 2.6	Typische Vierstrahlerekonfiguration (Airbus A340)	25
Bild 2.7	Schub-Gewichtsverhältnis nach Formel (2.1)	27
Bild 2.8	Wahl des Entwurfspunktes	28
Bild 2.9	Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Nebenstromverhältnis	29
Bild 2.10	Entwicklung der Turbineneintrittstemperatur.....	30
Bild 2.11	Entwicklung des Bypassverhältnis	31
Bild 2.12	Einfluss des Blattspitzenspaltes	31
Bild 2.13	Auftretende Reynoldszahlen am Flugzeug.....	32
Bild 2.14	Wirkungsgrade der Komponenten über den Schubbereich	33
Bild 2.15	Starttreibstoff mit unterschiedlichen Triebwerkskonfigurationen.....	33
Bild 4.1	Triebwerksfaktoren.....	45
Bild 4.2	Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der AEA-Methode.....	47
Bild 4.3	Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach der AEA-Methode	48
Bild 4.4	Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach Jenkinson	51
Bild 4.5	Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach Jenkinson.....	52
Bild 4.6	Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der TUB-Methode.....	56
Bild 4.7	Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeuge nach der TUB-Methode	57
Bild 4.8	Wartungskosten von Langstreckenflugzeuge nach der ATA67-Methode.....	61
Bild 4.9	Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeuge nach der ATA67-Methode	62
Bild 4.10	Wartungskosten von Langstreckenflugzeuge nach der DLH-Methode.....	68
Bild 4.11	Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeuge nach der DLH-Methode	69
Bild 4.12	Wartungskosten von Langstreckenflugzeuge nach der AI-Methode.....	75
Bild 4.13	Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeuge nach der AI-Methode	76
Bild 5.1	Triebwerkswartungskosten von Langstreckflugzeugen	78
Bild 5.2	Triebwerkswartungskosten von A330-300 und A340-300.....	79
Bild 5.3	Triebwerkswartungskosten von Mittelstreckflugzeugen.....	80
Bild 5.4	Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen der AEA-Methode	82
Bild 5.5	Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach Jenkison.....	82
Bild 5.6	Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen der TUB-Methode	83
Bild 5.7	Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen der ATA67-Methode ...	83
Bild 5.8	Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen der DLH-Methode	84
Bild 5.9	Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen der AI-Methode	84
Bild 5.10	Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen der AEA-Methode.....	86
Bild 5.11	Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach Jenkinson	86

Bild 5.12	Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen der TUB-Methode.....	87
Bild 5.13	Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen der ATA67-Methode..	87
Bild 5.14	Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen der DLH-Methode.....	88
Bild 5.15	Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen der AI-Methode.....	88
Bild 5.16	Flugzeugpreis verschiedener ziviler Verkehrsflugzeuge.....	90
Bild 5.17	Gesamter Schub der Flugzeuge	91
Bild 5.18	Trend der Triebwerkswartungskosten von Langstreckenflugzeugen	94
Bild 5.19	Trend der Triebwerkswartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen	95
Bild 6.1	Beispiel für Distributed Propulsion	96
Bild 6.2	Schubgewichtsverhältnisreduzierung bei Ausfall eines Triebwerks	98
Bild 6.3	Schubgewichtsverhältnisreduzierung bei Ausfall zweier Triebwerke	99
Bild 6.4	Eingefangener Massestrom bei 0 km und 11 km Höhe.....	101

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3.1	Daten ausgewählter Langstreckenpassagierflugzeuge	37
Tabelle 3.2	Daten ausgewählter Mittelstreckenpassagierflugzeuge	40
Tabelle 4.1	Inflation der deutschen Wirtschaft	41
Tabelle 4.2	Errechnete Inflationsfaktoren der deutschen Wirtschaft.....	43
Tabelle 6.1	Ausfallwahrscheinlichkeit unterschiedlicher Triebwerkskonfigurationen ..	97
Tabelle 6.2	Hot and High Flughäfen.....	100

Liste der Symbole

\dot{m}	Massestrom
A	Auftrieb
a	Jahr
b	Bestandteil
B	Burden
C	Kosten
d	Druck
D	Widerstand
E	Entfernung Gate zu Gate inklusive Rollwege und zusätzliche Manöverstrecken
e	Eulersche Zahl
F	Kraft
g	Fallbeschleunigung
G	Gleitzahl
GE	General Electrics
h	Höhe
H	Temperatur
k	Faktor
L	Lohn
m	Masse
n	Anzahl
N	Newton
p	Ausfallwahrscheinlichkeit eines Triebwerkes
P	Preis
R	Gaskonstante
S	Fläche
T	Schub
t	Zeit
u	Geschwindigkeit
W	Reichweite Flugzeug
Y	Jahr auf das sich die Methode bezieht
Z	Service-Jahre seit Auslieferung

Griechische Symbole

γ	Steigwinkel
Δ	Differenz
η	Wirkungsgrad
κ	Isentropenexponent

Indizes

<i>0</i>	Eingang
<i>a</i>	auf Jahr bezogen
<i>A/C</i>	Flugzeug
<i>AF</i>	Zelle, Airframe
<i>b</i>	auf Blockzeit bezogen
<i>B</i>	Bauart
<i>C</i>	Besatzung
<i>c</i>	Verdichterstufen
<i>CL</i>	Steigflug
<i>CR</i>	Reiseflug
<i>D</i>	Minderungsfaktor
<i>delivery</i>	Auslieferung
<i>DEP</i>	Abschreibung
<i>DMC</i>	Direkte Wartungskosten
<i>DOC</i>	Direkte Kosten
<i>e</i>	Ausgang
<i>E</i>	Triebwerk
<i>EL</i>	Arbeitseffizienz
<i>erstflug</i>	Erstflug
<i>f</i>	auf Flugstunde bezogen
<i>F</i>	Kraftstoff
<i>FEE</i>	Gebühren
<i>fl</i>	auf Flug bezogen
<i>flm</i>	auf Flugmeile bezogen
<i>ges</i>	Gesamt
<i>h</i>	auf eine Stunde bezogen
<i>IMC</i>	Indirekte Wartungskosten
<i>INF</i>	Inflation
<i>INS</i>	Versicherung
<i>inst</i>	installiert

<i>INT</i>	Zinsen
<i>M</i>	Wartung
<i>meth</i>	Methode
<i>miss</i>	Mission
<i>ML</i>	Wartungspersonal
<i>mm</i>	Materialalterung
<i>MM</i>	Wartungsmaterial
<i>MTO</i>	Maximum Start Schub
<i>OE</i>	Betriebsleergewicht
<i>s</i>	Wellen
<i>se</i>	Sektor
<i>T/O</i>	auf Start bezogen
<i>te</i>	Schubminderung
<i>thr</i>	Schubumkehr
<i>tot</i>	total
<i>u</i>	Währungsumrechnung
<i>W</i>	Flügelfläche
<i>ZF</i>	Zero Fuel Weight

Liste der Abkürzungen

A330	Airbus 330
AEA	Association of European Airlines
AI	Airbus Industrie
ATA	Air Transport Association
B737	Boeing 737
BAe 146	British Aerospace Bae 146 auch Avro RJ
BPR	Nebenstromverhältnis
CAM	Kostenverhältnis Arbeit/Material
CRH/C	Kostenverhältnis stündlich/ zyklisch
CS	Certification Specification
CSL	Cost Share Labour
CSL	Kostenanteil der Arbeit
CSM	Kostenanteil des Materials
DC-3	Douglas DC-3
DC-8	Douglas DC-8
DLH	Deutsche Lufthansa
DOC	Direct Operating Costs
ETOPS	Extended Twin Engine Operation Performance Standards

FAA	Federal Aviation Authority
FAR	Federal Aviation Regulation
Ft	Feet
IMC	Indirect Maintenance Costs
Jak-42	Jakolew Jak-42
kg	Kilogramm
ln	Natürlicher Logarithmus
<i>M</i>	molare Masse
Ma	Machzahl
MD11	McDonnell Douglas MD11 auch Boeing MD11
MPI	Materialpreisindex
NM	Nautische Meile
OAPR	Gesamtdruckverhältnis
OAPR	Over All Pressure Ratio
PAE	Passagieräquivalent
PAX	Passagieranzahl
SEF	Derating Factor (abh. von $m_{T/O,miss}$ und Take Off Field Performance)
SEV	Flexible Take Off Ratio
TFL	Take Off Balanced Field Length (ft) at $m_{T/O}$, 2000ft altitude, ISA +20°C
TFR	Take Off Field Length Reference : 10.000ft
TM	Technischer Altersfaktor
To	Tonne
TSY	Technologiefaktor für Systeme
TUB	Technische Universität Berlin

Verzeichnis der Begriffe und Definitionen

Betriebskosten

Die Betriebskosten (englisch direct operating costs (DOC)) setzen sich aus der Addition folgender Kosten zusammen: Abschreibung C_{DEP} , Zinsen C_{INT} , Versicherung C_{INS} , Kraftstoff C_F , Besatzung C_C , Gebühren C_{FEE} und Wartung C_M zusammen

(Scholz 1999)

Blockzeit

Die Blockzeit ist länger als die Flugzeit. Sie enthält noch die Bodenzeit, wie das Zurückschieben des Flugzeugs, Rollen (vor und nach dem Flug), Warten auf Freigaben und natürlich den Flug an sich.

(Scholz 1999)

Bypassverhältnis/ Nebenstromverhältnis

Das Bypassverhältnis ist der Nebenmassenstrom dividiert durch den Kernmassenstrom eines Turbofan-Triebwerks. Es ist eine elementare Kennzahl aus dem Triebwerksbau.

(Kozulovic 2016)

Distributed Propulsion

Distributed Propulsion, aus dem Englischen für verteilte Antriebskraft, ist eine Methode der Triebwerksverteilung an einem Flugzeug

(Polenta 2015)

ETOPS

ETOPS steht für Extended Twin Engine Operation Performance Standards. Dieser Standard ist für die Zulassung erforderlich. Es gibt verschiedene ETOPS Zulassungen mit verschiedenen Zeiten.

(Kozulovic 2016)

Die Zeit gibt an, wie weit ein zweistrahliger Flugzeug vom nächsten Ausweichflughafen entfernt sein darf, wenn eines der zwei Triebwerke ausfällt. Es gibt zum Beispiel ETOPS 60, 120 und 180. Wobei man bei einer ETOPS 180 Zulassung kaum noch Einschränkungen hat.

(Kozulovic 2016)

Flugzeit

Flugzeit ist die Zeit, in der sich das Flugzeug selbständig mit seinen Triebwerken bewegt.

Sie beginnt, wenn das Flugzeug sich zum Zwecke des Fluges bewegt und endet nach der Landung, wenn die Triebwerke abgeschaltet werden.

(Scholz 1999)

Flugzyklus oder Flug

Kosten können auch pro Flugzyklus errechnet werden. Das heißt man betrachtet den gesamten Flug. Um diese auf die Einheit pro Flugstunde umzurechnen wird durch die Flugzeit dividiert. (Scholz 1999)

Gesamtdruckverhältnis

Das Gesamtdruckverhältnis ist die Multiplikation der einzelnen Stufendruckverhältnisse, also der Drucksteigerungen pro Verdichterstufe. Es ist eine elementare Kennzahl aus dem Triebwerksbau.

(Kozulovic 2016)

Langstrecke

Für die Berechnungen wurde die Langstrecke mit einer Zeit von 8 Stunden definiert.

Masse Operating Empty

Es ist das Leergewicht des Flugzeuges. Es ist das Gewicht der Flugzeugstruktur ergänzt um die ständig eingebaute zusätzliche Ausrüstung.

(Wikipedia 2017d)

Mittelstrecke

Für die Berechnungen wurde die Mittelstrecke mit einer Zeit von 2,5 Stunden definiert.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ein Flugzeug benötigt einen bestimmten Schub, der in gängigen Konfigurationen auf zwei, drei oder vier Triebwerke aufgeteilt werden kann. Die Auswahl über die Triebwerksanzahl ist ein elementarer Baustein im Flugzeugbau und von wichtiger Bedeutung.

Im Hinblick auf die Flugzeugbestellungen der letzten zehn Jahre ist ein klarer Trend zu erkennen, dass sehr viel mehr Zweistrahler bestellt werden im Vergleich zu Drei- und Vierstrahlern.

Es stellt sich die Frage woran das liegt. Die Vermutung liegt nahe, dass es mit den Wartungskosten, die abhängig von der Anzahl der Triebwerke sind, zu tun hat. In diesem Zusammenhang muss auch über den Flugzeugentwurf von neuen Flugzeugen nachgedacht werden und wie die Schubanforderungen erfüllt werden können.

Um dieser Vermutung nachzugehen werden existierende Formeln zur Berechnung von Wartungskosten mit vergleichbaren Flugzeugen angewendet und an die heutigen Verhältnisse angepasst. Dabei ist es besonders wichtig zuverlässige und den Formeln entsprechende Informationen zu verwenden um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten.

Weiterführend geht der Trend zu Triebwerkskonfigurationen mit sehr vielen kleine Triebwerken, welches in Fachkreisen auch Distributed Propulsion genannt wird. Der Einfluss dieser Konfiguration auf den täglichen Betrieb und eine Betrachtung der bestehenden Luftfahrtgesetze sollen diese Alternative beleuchten.

1.2 Begriffsdefinitionen

Der Titel der Projektarbeit lautet: Wartungskosten von Passagierflugzeugen bei verschiedener Triebwerksanzahl berechnet nach DOC-Methoden.

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile des Titels erläutert:

Die Wartungskosten sind nach dem Gabler Wirtschaftslexikon (**Lackes 2017**) wie folgt definiert:

„Kosten der Reinigung, Pflege und laufenden Instandhaltung (kleinere Reparaturen) von Geräten, Maschinen und maschinellen Anlagen aller Art sowie von Software (Softwarewartung).“

Ein Passagierflugzeug ist ein Vehikel zum Transport von zivilen Personen und Fracht in der Luft, welches von einer Fluggesellschaft kommerziell genutzt wird. (**Wikipedia 2018s**)

Für die Projektarbeit werden Flugzeuge betrachtet, welche der CS 25 zuzuordnen sind.

Die betrachteten Passagierflugzeuge besitzen Turbofantriebwerke mit mittleren bis großen Nebenstromverhältnissen. Turbofantriebwerke erzeugen Schub durch Strahlbeschleunigung und besitzen zwei getrennte Massenströme. (**Kozulovic 2017**)

Die betrachteten DOC-Methoden, welches aus dem Englische stammt und Direct Operating Cost (direkte Betriebskosten) bedeutet, beschreiben Kosten, die einer Quelle zugeordnet werden können. Hierfür haben Institutionen Methoden aufgestellt um die direkten Betriebskosten der Passagierflugzeuge abzuschätzen. (**Scholz 1999**)

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es existierende Passagierflugzeuge die sich in ihren Abmessungen und ihrer Leistung ähneln im Hinblick auf die Anzahl der Triebwerke zu mit gängigen DOC-Methoden zu vergleichen. Besondere Fokus liegt auf den Wartungskosten der Triebwerke und welchen Anteil sie an den Gesamtwartungskosten haben.

Am Ende soll ein Trend aufgezeigt werden, der genau beschreibt, wie die Anzahl der Triebwerke die Wartungskosten beeinflusst. Zusätzlich wurde die Distributed Propulsion betrachtet und operationelle Auswirkungen durch den Einsatz vieler Triebwerke untersucht.

1.4 Literaturübersicht

Die Projektarbeit basiert auf dem Vorlesungsskript von Professor Dr. -Ing. Dieter Scholz (**Scholz 1999**). Im Kapitel der Entwurfsbewertung im Flugzeugbau wird über die verschiedenen Methoden zur Berechnung der Betriebskosten berichtet. Besonders die Berechnung der Wartungskosten des gesamten Flugzeugs und der inbegriffenen Wartungskosten für das Triebwerk waren sehr hilfreich. Es wurde über die DOC-Methoden nach AEA und nach Jenkinson berichtet.

Des Weiteren war auch die die Präsentation der Methode der Technischen Universität Berlin von Professor Dr.-Ing. Jürgen Thorbeck (**Thorbeck 2013**) sehr hilfreich, aus der die TUB-Methode hervorging. Für die ATA67-Methode wird sich auf **ATA 1967** bezogen. Die Methode der American Airlines (**AA 1980**) referenziert sich auf **ATA 1967** ist von der Berechnung aber identisch. In dem Dokument **AI 1989** wird die AI-Methode dargestellt und in der Projektarbeit ausgewertet. Das Dokument der Lufthansa, **DLH 1982** diente als Quelle der DLH-Methode.

Auf Basis dieser Schriften werden in dieser Projektarbeit zivile Passagierflugzeuge hinsichtlich ihrer Wartungskosten, insbesondere die Triebwerkswartungskosten, berechnet und verglichen.

Bezüglich dieses Themas haben sich mehrere Arbeiten damit befasst. Jedoch wurde nicht in der entsprechenden Tiefe unterschiedliche Wartungsmethoden von mehreren Institutionen verglichen. **Van Bodegraven 1990** (Boeing) befasst sich mit der geschichtlichen Entwicklung und der Anwendbarkeit von DOC-Methoden am Beispiel der DC-3. Dabei werden keine konkreten Berechnungsmethoden vorgestellt. Häufig werden einfache Näherungen ohne im Dienst befindliche Flugzeuge zur Ermittlung der Wartungskosten verwendet, z.B. **Herrmann 2010** verwendet ausschließlich die TUB-Methode. Für seine Diplomarbeit beschränkt er sich in seiner Auswertung auf die Gesamtwartungskosten und differenziert nicht, wie diese Arbeit, zwischen Airframe und Triebwerke.

1.5 Aufbau der Arbeit

- Abschnitt 2** vermittelt die Grundlagen der Projektarbeit. Es wird über die aktuelle Marktsituation, gängige Triebwerkskonfigurationen, Schubanforderungen, Möglichkeiten der Schuboptimierung und deren Folgen, Betriebskosten und speziell die Wartungskosten aufgeklärt.
- Abschnitt 3** beschreibt die zur Berechnung verwendeten Mittelstrecken- und Langstreckenpassagierflugzeuge mit allen zur Berechnung benötigten Parameter.
- Abschnitt 4** erläutert die verschiedenen DOC-Methoden zur Berechnung der Wartungskosten und speziell der Triebwerkswartungskosten. Beschrieben werden die AEA-Methode, die Methode nach Jenkinson und die Methode der Technischen Universität Berlin (TUB), die ATA67-Methode, die DLH-Methode und die AI-Methode. Des Weiteren werden auf Grundlage der Daten aus Abschnitt 3 die dort beschriebenen Flugzeuge hinsichtlich ihrer Wartungskosten berechnet und untereinander verglichen.
- Abschnitt 5** widmet sich dem Vergleich der drei DOC-Methoden untereinander. Außerdem wird der Anteil der Triebwerkswartungskosten an den Gesamtwartungskosten betrachtet. Am Ende folgt noch eine kritische Betrachtung der Methoden.
- Abschnitt 6** behandelt weitere Triebwerkskonfigurationen wie Distributed Propulsion. Dort werden Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnet und Schubgewichtsverhältnisse betrachtet. Abschließend werden operationelle Aspekte in Abhängigkeit der Triebwerksanzahl betrachtet.
- Abschnitt 7** besteht aus der Zusammenfassung in der kurz die wichtigsten Ergebnisse präsentiert werden.

2 Grundlagen

2.1 Aktuelle Marktsituation

Auf dem aktuellen Flugzeugmarkt werden vierstrahlige Flugzeuge nur noch in geringen Mengen abgesetzt. Der Anteil sank in den letzten Jahren kontinuierlich bis auf unter 1 % im Jahr 2016 wie Bild 2.1 belegt.

Der A380 wurde fast nur noch von Emirates bestellt während die Boeing 747-8 nur noch als Frachter gefragt ist. Diese Vierstrahler sind damit eine aussterbende Flugzeuggruppe und es wird im Laufe dieser Projektarbeit untersucht, welche Gründe dieser Trend hat.

Die Daten, für das untenstehende Diagramm entstammen der Airbus (**Airbus Archiv 2018**) und der Boeing (**Boeing 2018**) Webseite.

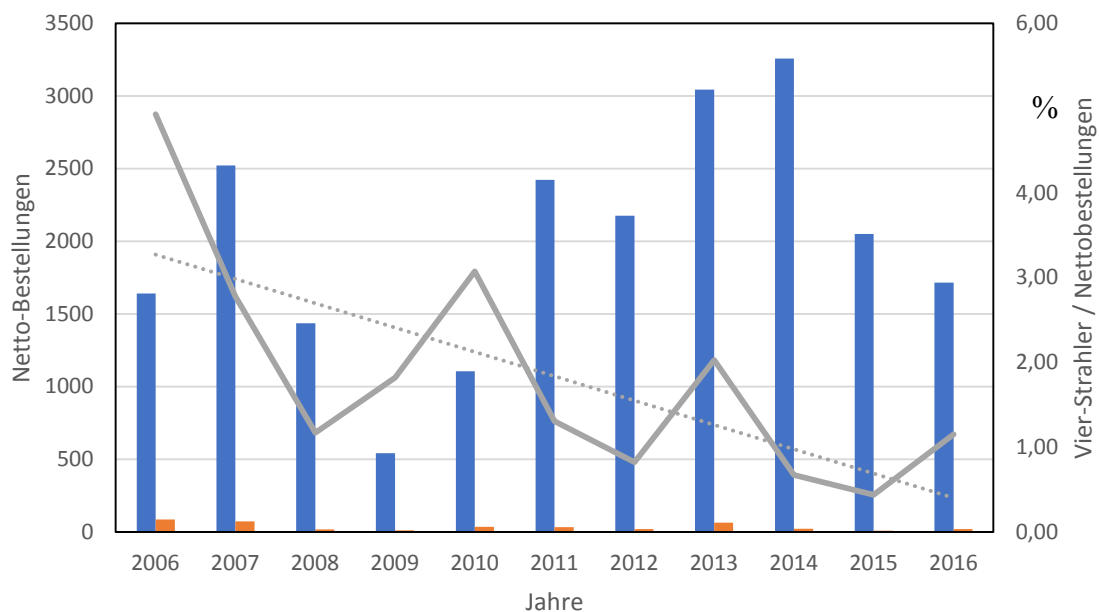


Bild 2.1 Nettobestellungen von Zwei- und Vierstrahlern von 2006 bis 2016

- Zweistrahler
- Vierstrahler
- Anteil der Vierstrahler von den Nettobestellungen
- ⋯ Lineare Regression des Anteiles der Vierstrahler

2.2 Betrachtung gängiger Triebwerksanforderung

In der zivilen Luftfahrt sind, was die Anzahl an Triebwerken betrifft, drei Möglichkeiten üblich. Es kann mit zwei, drei oder vier Triebwerken geflogen werden. Mit einem Triebwerk ist aus Gründen der Sicherheit nicht möglich.

Die Entscheidung für die Anzahl an Triebwerken hängt von den bei 2.3 erläuterten Anforderungen ab. Weiterhin kommen betriebliche Gesichtspunkte wie Zuverlässigkeit und die damit verbundene ETOPS Zertifizierung und Erfahrungen des Herstellers hinzu.

Für die Zulassung von Flugzeugen müssen bestimmte Grundvoraussetzungen erfüllt werden. Einen Bereich bilden die Start- und Steigfluranforderungen Siehe Kapitel 2.3.

Aber auch das Giermoment, bei Ausfall eines Triebwerks, muss für die Auslegung des Seitenruders betrachtet werden, wie in Bild 2.2 zu sehen ist. Bei großem Giermoment vom Triebwerk muss entweder ein dementsprechend großes Seitenleitwerk entwickelt werden oder der Hebelarm zwischen Gierpunkt und Seitenleitwerk maximiert werden (**Herrmann 2010, S. 23**).

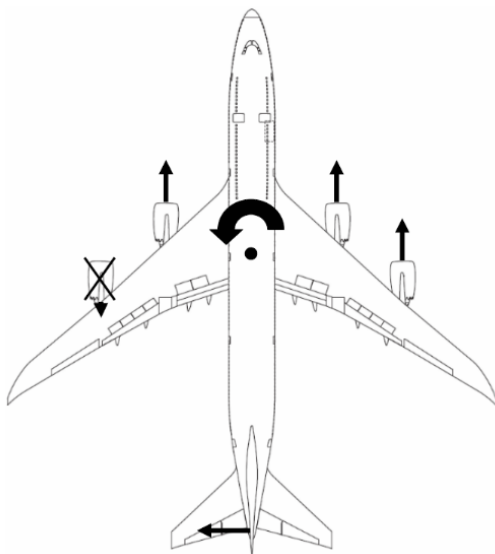


Bild 2.2 Kräftebilanz bei Ausfall des kritischen Triebwerks eines Vierstrahlers (**Herrmann 2010, S. 23**)

Zweistrahler

Flugzeuge mit zwei Triebwerken (Zweistrahler), wie in Bild 2.4 dargestellt, müssen für die Zulassung bezüglich ihrer Start- und Steigleistung mehr Leistung pro Triebwerk im Vergleich mit Drei- und Vierstrahlern haben. Bei Ausfall eines Triebwerks muss das einzige noch funktionierende Triebwerk die Leistung des ausgefallenen Triebwerks kompensieren. Jedes Triebwerk muss dadurch 200 % des normalen Schubs liefern. Durch das entstehende Giermoment ist es empfehlenswert die Triebwerke in Rumpfnähe anzuordnen (**Kozulovic 2016**, S. 33). Flugzeuge mit Triebwerken die sich nahe am Rumpf befinden, wie es bei Zweistrahlern häufig der Fall ist erfahren an der Position an der sich die Gondel des Triebwerks befindet eine starke negative Beeinflussung der Strömung, wie es in Bild 2.3 zu sehen ist (**Herrmann 2010**, S. 21).

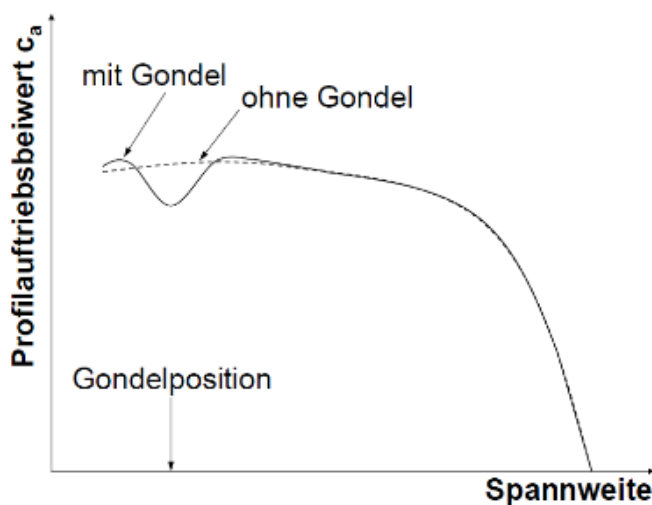


Bild 2.3 Auftriebsbeeinflussung durch Installation eines Triebwerks unter dem Flügel (**Herrmann 2010**, S. 21)

Andererseits sind die Anschaffungs- und Wartungskosten bei zwei Triebwerken minimal. Durch die Erhöhung des Nebenstromverhältnis im Triebwerk kann es zu Integrationsproblemen unter dem Flügel kommen (**Kozulovic 2016**, S.33).

Um die Reichweite mit einem ausgefallenen Triebwerk zu erhöhen muss das Flugzeug nach ETOPS zugelassen werden (**Kozulovic 2016**, S. 33).



Bild 2.4 Typische Zweistrahlerkonfiguration (Airbus A330) (**Kozulovic 2016**)

Dreistrahler

Flugzeuge mit drei Triebwerken (Dreistrahler), wie in Bild 2.5 dargestellt, benötigen eine kleinere Antriebsleistung als Zweistrahler. Bei Ausfall eines Triebwerks müssen die verbleibenden zwei Triebwerke zusammen 150 % des Schubs liefern. Dadurch sind die Triebwerke kleiner und kompakter.

Das mittlere Triebwerk leitet den Schub momentarm ein und hat keine ungünstigen Wechselwirkungen am Flügel und den Steuerrudern. Die Integration in die Zelle ist jedoch aufwendig und die Wartungskosten steigen aufgrund der schlechten Zugänglichkeit. Des Weiteren wird die Schwerpunktlage negativ beeinflusst.

(Kozulovic 2016, S.34)



Bild 2.5 Typische Dreistrahlerkonfiguration (MD-11) (Kozulovic 2016)

Vierstrahler

Flugzeuge mit vier Triebwerken (Vierstrahler), wie in Bild 2.6 dargestellt, ermöglichen die Leistungsärmsten Triebwerke. Bei Ausfall eines Triebwerks müssen die drei funktionstüchtigen Triebwerke 133 % mehr Schub liefern als im Normalfall bei dem alle Triebwerke verwendet werden.

Das Giermoment ist größer durch die rumpferne Anordnung und die Anschaffungs- und Wartungskosten sind groß.

Die Integration von Triebwerken mit hohem Nebenstromverhältnis ist durch den Abstand von Flügel zum Boden gut gewährleistet.

(Kozulovic 2016, S.35)



Bild 2.6 Typische Vierstrahlerkonfiguration (Airbus A340) (Kozulovic 2016)

2.3 Schubanforderung an das Flugzeug

Der benötigte Schub beim Entwurf eines Flugzeuges ergibt sich aus verschiedenen Anforderungen der CS25. Dabei werden die verschiedenen Flugphasen betrachtet und daraus der Mindestschub pro Gewicht, die minimale Flächenbelastung oder ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen bestimmt. Die fünf Phasen sind Start, 2.Segment, Reiseflug, Landung und Durchstarten. Beispielhaft wird hier das 2. Segment betrachtet.

Der climb gradient ist abhängig von der Triebwerksanzahl und wird durch die CS25 vorgegeben. Zweistraher benötigen einen climb gradient von mindesten 2,4 %, Dreistraher 2,7 % und Vierstrahler 3,0 %. Dies gilt ab dem Zeitpunkt wo das Fahrwerk komplett eingefahren ist, ein Triebwerk ausgefallen ist sowie die restlichen im maximum continuous arbeiten und das Flugzeuggewicht gleich dem Gewicht am Ende der Landebahn ist. (Scholz 1999)

Formel (2.1) gilt auch für das Durchstarten wobei die Steiggradienten nun für Zweistraher bei mindestens 2,1 %, Dreistraher 2,4 % und Vierstrahler 2,7 % liegen. Dies muss erfüllt werden bei einem ausgefallenen Triebwerk, ausgefahrenen Landeklappen. bei maximalen Landegewicht ausgefahrenem Fahrwerk sowie einer Geschwindigkeit zwischen $1,3 V_s$ und $1,5 V_s$. Der Steiggradient kann nach (2.2) in den Steigwinkel umgerechnet werden. (Scholz 1999)

$$\frac{T_{T/O}}{m_{MTO} \cdot g} = \left(\frac{N}{N-1} \right) \left(\frac{1}{L/D} + \sin \gamma \right) \quad (2.1)$$

$$\tan \gamma = \frac{\text{climb gradient}}{100} \quad (2.2)$$

Das Bild 2.7 zeigt das Schub-Gewichts-Verhältnis der Formel (2.1) von 2 Triebwerken bis 20 Triebwerken bei einer Gleitzahl von 10 bis 20. Die Steigrate für Flugzeuge mit vier und mehr Triebwerken wurde konstant mit 3 % angenommen. Trotz mehreren Beispiele aus dem Flugzeugbau wie Antonow 225, Boeing B-47 und Boeing B-52 ist keine Vorgabe der Steigrate in der CS25 für Flugzeuge mit mehr als 4 Triebwerke genannt. Der Verlauf zeigt deutlich die geringeren Schubanforderungen für Flugzeuge mit mehreren Triebwerken und höheren Gleitzahlen.

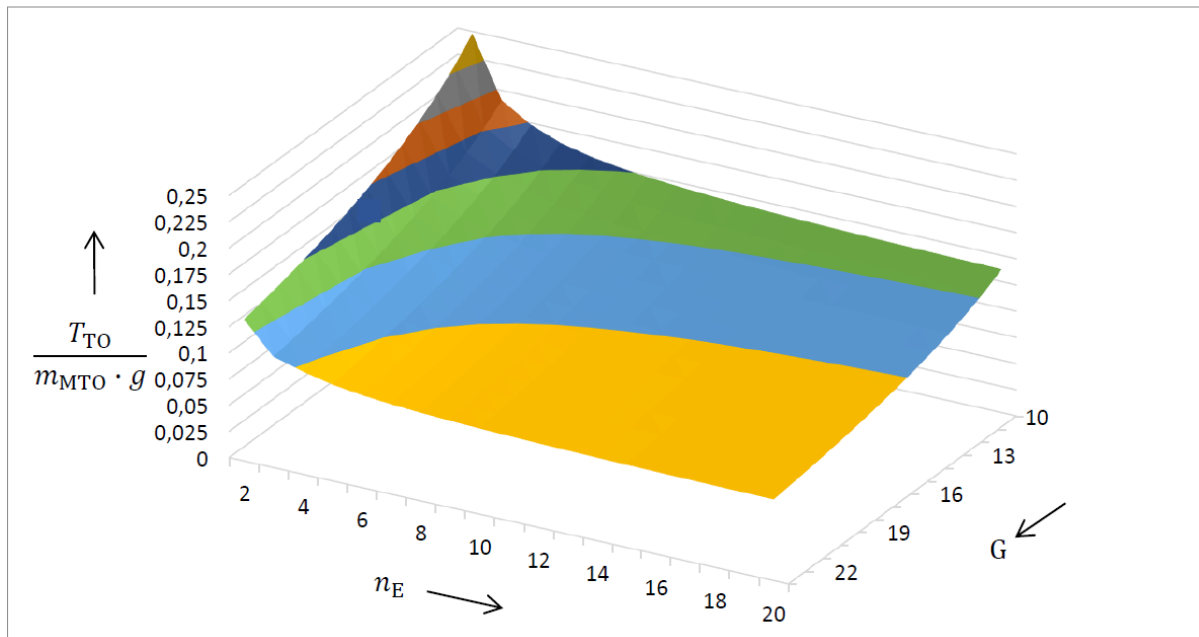







Bild 2.7 Schub-Gewichtsverhältnis nach Formel (2.1)

n_E	Triebwerksanzahl
G	Gleitzahl
$\frac{T_{TO}}{m_{MTO} \cdot g}$	Schubgewichtsverhältnis
	Schubgewichtsverhältnis von 0,25-0,225
	Schubgewichtsverhältnis von 0,225-0,2
	Schubgewichtsverhältnis von 0,2-0,175
	Schubgewichtsverhältnis von 0,175-0,15
	Schubgewichtsverhältnis von 0,15-0,125
	Schubgewichtsverhältnis von 0,125-0,1

Nach Betrachtung der unterschiedlichen Ergebnisse der fünf Phasen wird ein Entwurfsdiagramm eingezeichnet. Der Entwurfspunkt wird so gewählt, dass er alle Anforderung erfüllt und dabei ein möglichst geringes Schubgewichtsverhältnis besitzt (**Scholz 1999**).

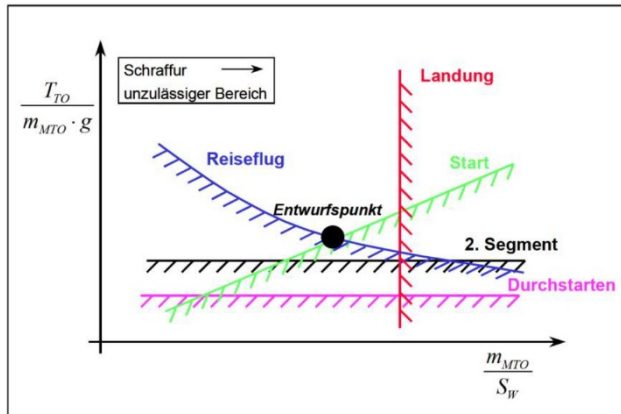


Bild 2.8 Wahl des Entwurfspunktes (Scholz 1999)

$$\frac{T_{TO}}{m_{MTO} \cdot g} \quad \text{Schubgewichtsverhältnis}$$

$$\frac{m_{MTO}}{S_W} \quad \text{Flächenbelastung}$$

2.4 Möglichkeiten der Schuboptimierung

Der für die Fluggesellschaften wichtigste Parameter sind die Betriebskosten. Die Anzahl der Triebwerke besitzt großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Eine Studie vom Cranfield Institute of Technology kommt zu dem Schluss, dass Zweistrahler geringere Betriebskosten besitzen als Vierstrahler. (Herrmann 2011)

Dem damit folgendem Ansatz, Vierstrahler durch Zweistrahler mit starken Triebwerken zu ersetzen ist nur begrenzt möglich.

Um den Schub zu erhöhen ist laut der vereinfachten Schubgleichung (Formel 2.3) die Erhöhung des Massestromes und der Differenz aus Austrittsgeschwindigkeit minus Einsauggeschwindigkeit möglich.

$$F = \dot{m} \cdot (u_e - u_0) \quad (2.3)$$

Die Erhöhung der Austrittsgeschwindigkeit reduziert jedoch den Vortriebswirkungsgrad.

Die Erhöhung des Massestromes ist somit die bessere Alternative. Dies kann durch ein erhöhtes Bypassverhältnis realisiert werden. (Kozulovic 2016)

2.4.1 Folgen der Steigerung des Bypassverhältnisses

Eine große Erhöhung des Bypassverhältnisses ist nicht sinnvoll, da sich der Fan mit den Blattspitzen, aufgrund des großen Umfangs, im Überschall befinden würde. Das würde zu Ablösungen und hohen Schallemissionen führen. Die Verbindung zu einer langsam drehenden Niederdruckturbinen oder einem Getriebe dazwischen ermöglichen es die Drehzahl des Fans herabzusetzen. Eine langsam rotierende Niederdruckturbinen erzeugt weniger Leistung. Ein größerer Fan benötigt mehr Leistung aufgrund seiner gesteigerten Masse. Mehr Leistung können mehrere Turbinenstufen generieren, welche zusätzliches Gewicht und Volumen mitbringen. Bei sehr großen Bypassverhältnissen ist ein Getriebe essentiell. **(Kozulovic 2016)**

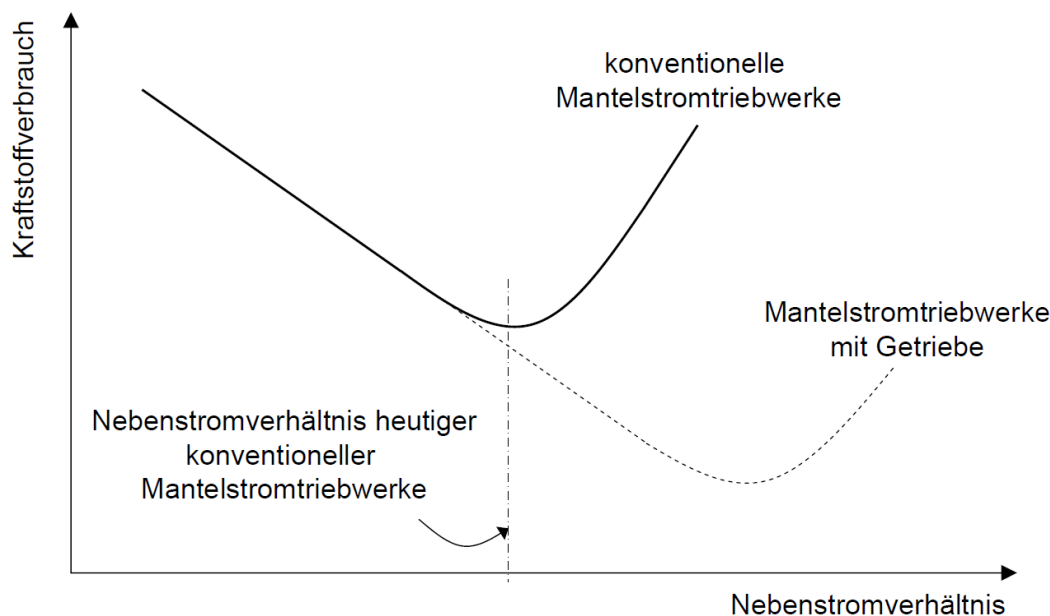


Bild 2.9 Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Nebenstromverhältnis **(Herrmann 2010, S. 7)**

Bild 2.9 zeigt deutlich den Vorteil eines Triebwerkes mit Getriebe zu einem herkömmlichen Getriebe. Das Gewicht des Getriebes wird durch die Einsparung zusätzlicher Turbinenstufen mehr als ausgeglichen.

2.4.2 Folgen der Steigerung der Turbineneintrittstemperatur

Die hohe benötigte Leistung des Fans kann durch eine erhöhte Turbineneintrittstemperatur erreicht werden, da die Turbinen mehr Leistung generieren kann. Jedoch beschränken hohe Fliehkräfte und abnehmende Festigkeiten bei hohen Temperaturen eine signifikante Erhöhung **(Kozulovic 2016)**.

Zwingend notwendig ist dabei eine komplexe Kühlung der ersten Turbinenstufe bestehend aus Stator und Rotor. In Bild 2.10 werden die Unterschiede zwischen theoretischen Grenzwerten des Materials und der tatsächlich umgesetzten Temperatur bei der Einführung der gekühlten Schaufeln sichtbar. Die Unterschiede betragen mehrere hundert Kelvin. Da größere Triebwerke oft eine höhere Verdichtung aufweisen, besitzt die Kühlluft die aus dem Verdichter entnommen wird eine höhere Temperatur wodurch die Kühlfähigkeit reduziert wird (Herrmann 2011).

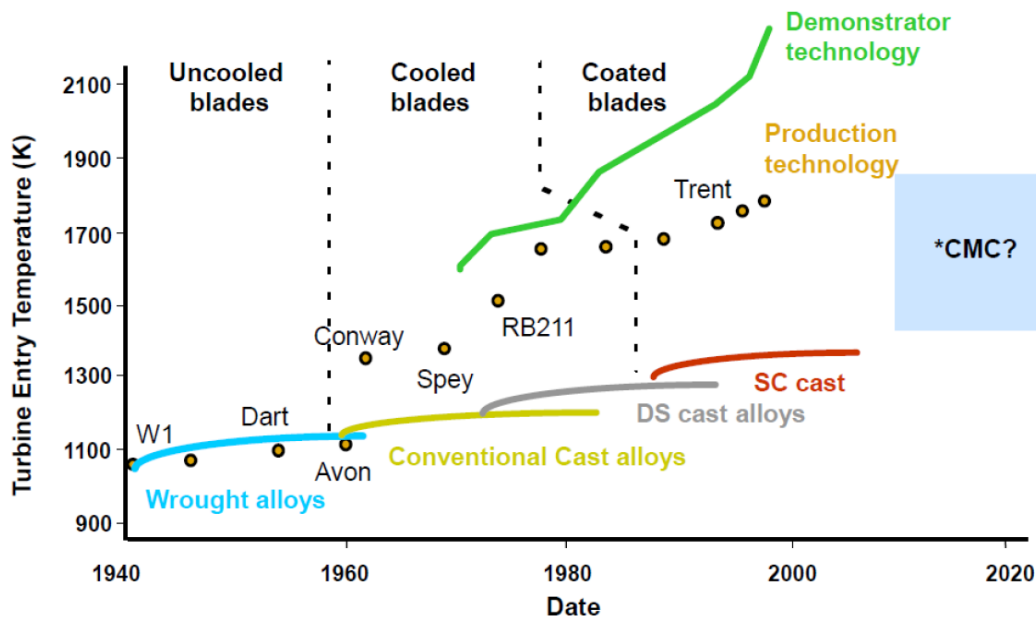


Bild 2.10 Entwicklung der Turbineneintrittstemperatur (Kozulovic 2017, S. 418)

Weiterhin wird deutlich, dass die Turbineneintrittstemperatur in den letzten Jahrzehnten von rund 1100K bis auf deutlich über 1700K gesteigert wurde. Einen besonders steilen Anstieg gab es in den 70er Jahren als mit dem RB211 Mantelstromtriebwerk zum ersten Mal höher Bypassverhältnisse von vier zu eins und höher etabliert wurden, siehe auch Bild 2.11 Die anschließende Stagnation in beiden Diagrammen ist auf geringe Ölpreise zurückzuführen. (Kozulovic 2016)

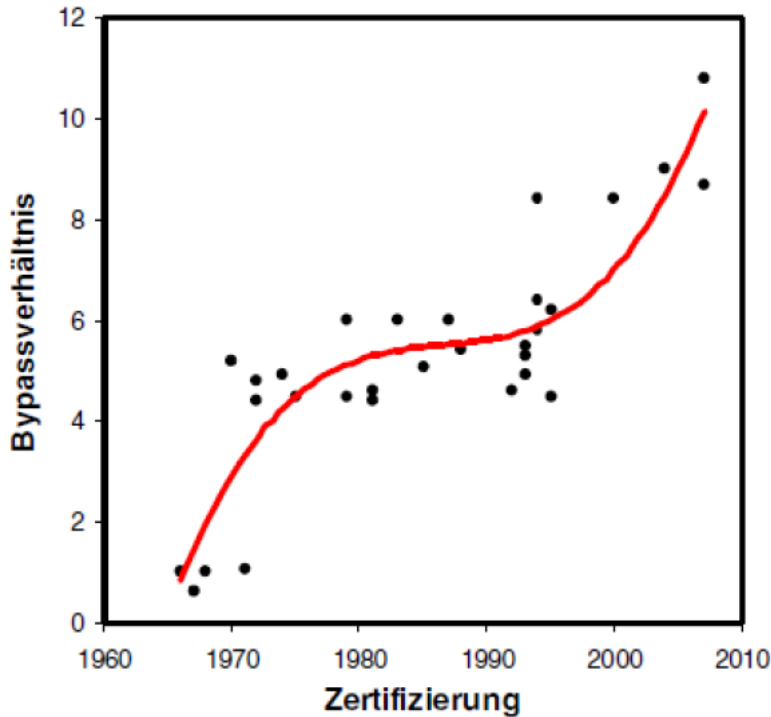


Bild 2.11 Entwicklung des Bypassverhältnis (Kozulovic 2017, S. 38)

2.4.3 Komponentenwirkungsgrade in Abhängigkeit der Triebwerksgröße

Die Schubkraft des Triebwerkes und die damit verbundene Größe der Komponenten beeinflussen den Wirkungsgrad. Grund dafür ist, dass der relative Blattspitzenspalt, aufgrund der größeren nach außen gerichteten Zentrifugalkraft und damit verbundenen Ausdehnung, bei kleinen und schnell drehenden Triebwerken größer ist. Dadurch entstehen größere Randwirbel, die einen Einfluss auf die Aerodynamik haben, wie in Bild 2.12 zu sehen ist. (Herrmann 2010)

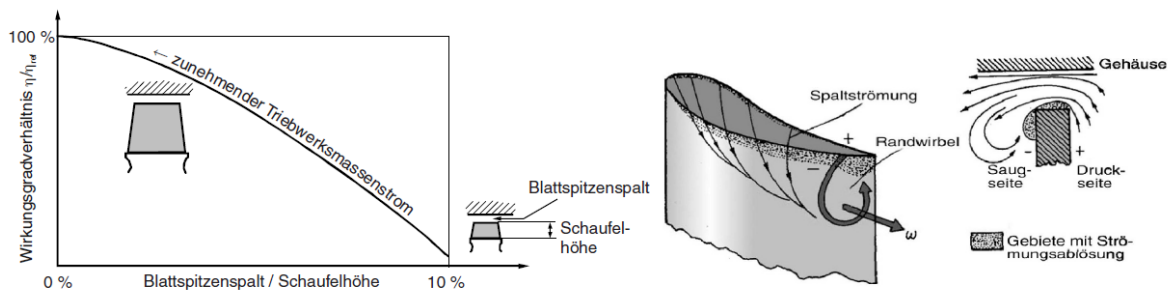


Bild 2.12 Einfluss des Blattspitzenspaltes (Herrmann 2010, S. 13)

Ein weiterer Grund ist die Reynoldszahl die unter anderen abhängig von der Länge des Triebwerks und der Strömungsgeschwindigkeit ist. Geringere Reynoldszahlen sorgen dafür, dass die Strömung sich schneller ablöst was zu zusätzlichen Widerstand führt. Aufgrund ihrer

geringen Größe und der niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten liegen die Reynoldszahlen mehrere Größenordnungen unter den eines Flugzeuges, siehe Bild 2.13. (**Kozulovic 2017**)

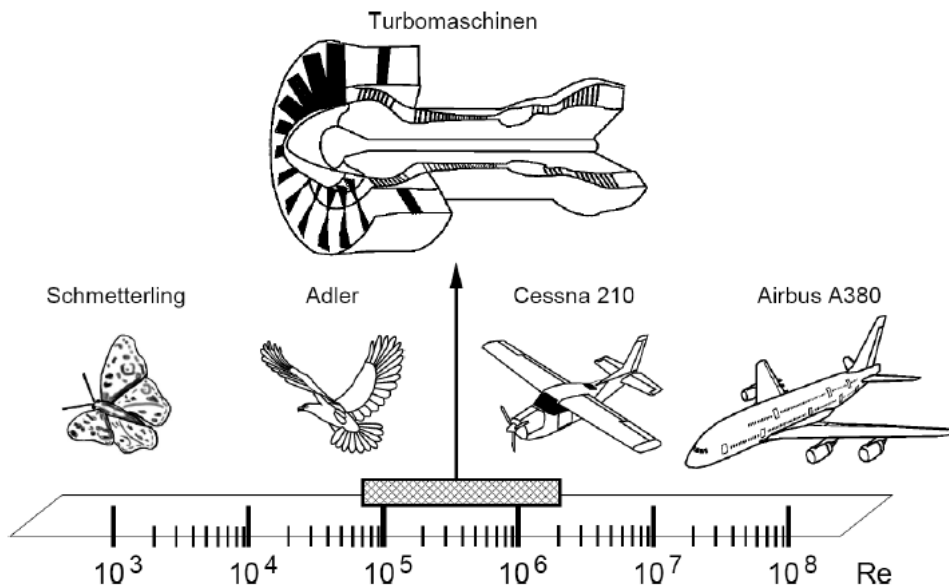


Bild 2.13 Auftretende Reynoldszahlen am Flugzeug (nach **Kozulovic 2017**, S. 20)

Die wahren Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten sind nur dem jeweiligen Hersteller bekannt. Eine Iteration von Herrmann kam zu dem Schluss, dass die Komponenten einen höheren Wirkungsgrad besitzen, wenn das Triebwerk für mehr Schub ausgelegt ist. Das Bild 2.14 belegt dies an den Komponenten Verdichter, Turbine, Bläser also der Fan und der Schubdüse. (**Herrmann 2010**)

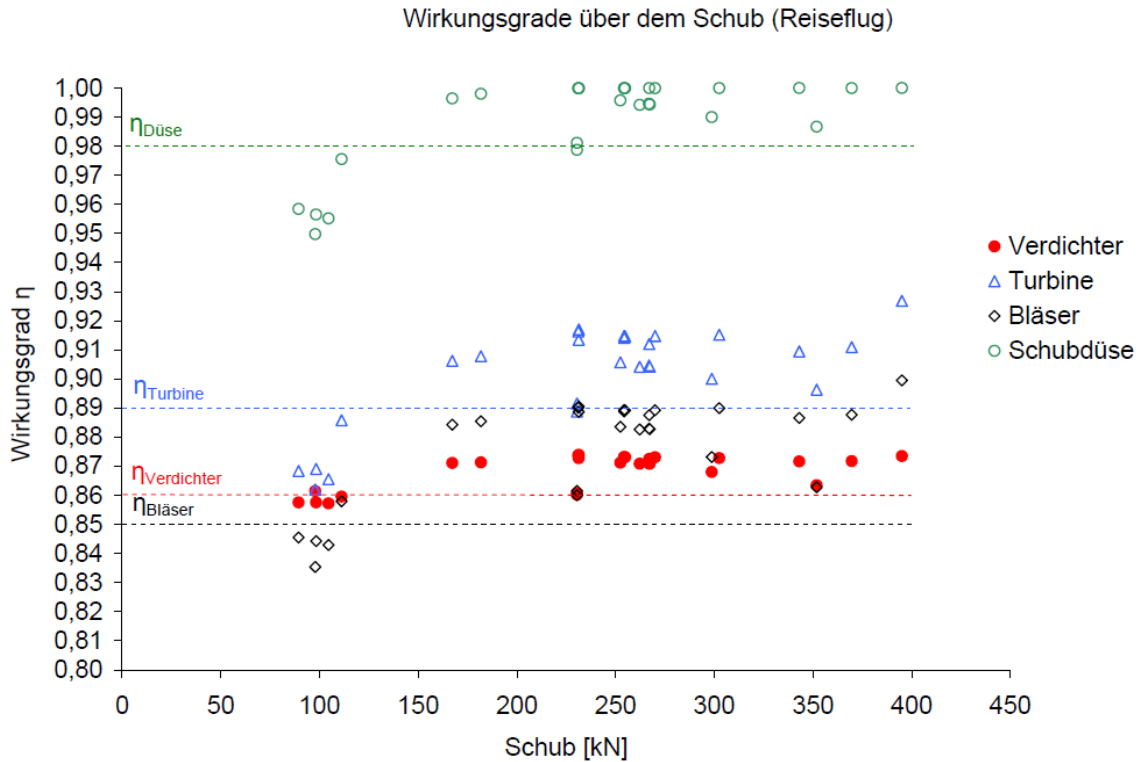


Bild 2.14 Wirkungsgrade der Komponenten über den Schubbereich (Herrmann 2010, S. 12)

Das Bild 2.15 zeigt den Treibstoffverbrauch einer 737-600 bei Erhöhung der Triebwerkeanzahl um 5556 km zu fliegen. Durch den reduzierten Wirkungsgrad muss eine Erhöhung des Treibstoffgewichtes mitgetragen werden (Chan 2008).

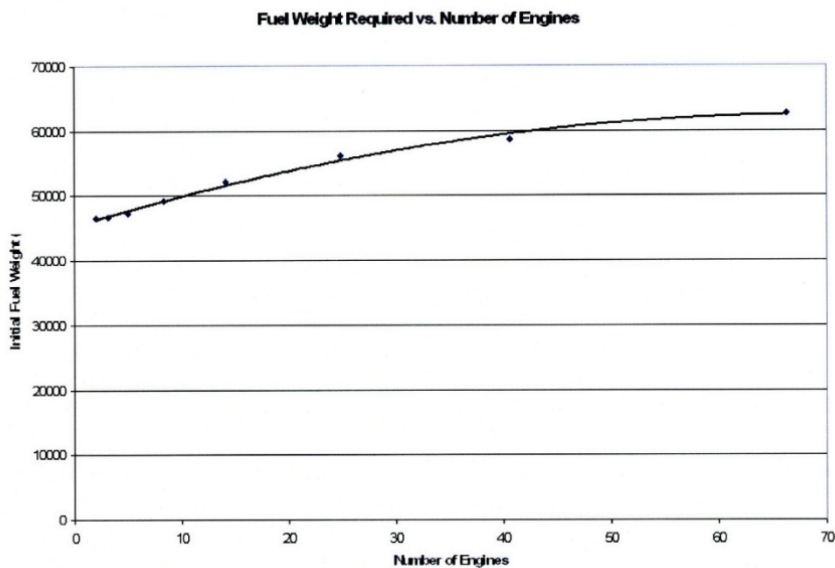


Bild 2.15 Starttreibstoff mit unterschiedlichen Triebwerkskonfigurationen (Chan 2008)

2.5 Einführung in die Betriebskosten

Um ein Flugzeugkonzept zu bewerten muss man es aus verschiedenen Sichtweisen betrachten. Wichtige Sichtweisen sind die des Herstellers, die der Zulieferindustrie, die des Betreibers, die der Passagiere, die der Zulassungsbehörde, sowie der Bevölkerung (**Scholz 1999**).

Bei der Betrachtung dieser Arbeit werden wir uns auf die Sichtweise des Betreibers konzentrieren und die Direct Operating Costs (DOC) (Direkte Betriebskosten) bearbeiten. Diese sind in der Luftfahrt am meisten verbreitet und helfen den Betreibern der Flugzeuge bei der Wahl des Fluggerätes (**Scholz 1999**).

Kosten sind nach dem Gabler Wirtschaftslexikon **Wischermann 2013** wie folgt definiert:

Kosten sind der bewertete Verzehr von wirtschaftlichen Gütern materieller und immaterieller Art zur Erstellung und zum Absatz von Sach- und/oder Dienstleistungen sowie zur Schaffung und Aufrechterhaltung der dafür notwendigen Teilkapazitäten. Kosten werden üblicherweise aus dem Aufwand hergeleitet.

Die DOC lassen sich nach **Scholz 1999** aus folgenden Kosten berechnen:

- Abschreibung C_{DEP}
- Zinsen C_{INT}
- Versicherung C_{INS}
- Kraftstoff C_F
- Besatzung C_C
- Gebühren C_{FEE}
- Wartung C_M

Die Kosten der DOC C_{DOC} ergeben sich aus der Addition der einzelnen Größen (**Scholz 1999**)

$$C_{DOC} = C_{DEP} + C_{INT} + C_{INS} + C_F + C_C + C_{FEE} + C_M \quad (2.4)$$

Des Weiteren können Kosten in die folgenden Gruppen unterteilt werden:

- Direkte Kosten
- Indirekte Kosten
- Fixe Kosten (Non Recurring Costs)
- Variable Kosten (Recurring Costs)

Direkte Kosten (Einzelkosten) sind Kosten, die sich eindeutig einem einzelnen Projekt zurechnen lassen.

Indirekte Kosten (Gemeinkosten) sind Kosten, die sich nicht eindeutig einem Projekt zuordnen lassen und durch übergeordnete Unternehmensaktivitäten anfallen.

Fixe Kosten sind Kosten die unabhängig von der Produktionsmenge des Unternehmens anfallen.

Variable Kosten sind abhängig von der Menge der produzierten Produkte. Sie ändern sich proportional mit der Änderung der hergestellten Produkte.

2.6 Definition der Wartungskosten

Wartungskosten sind nach dem Gabler Wirtschaftslexikon (**Lackes 2017**) wie folgt definiert:

„Kosten der Reinigung, Pflege und laufenden Instandhaltung (kleinere Reparaturen) von Geräten, Maschinen und maschinellen Anlagen aller Art sowie von Software (Softwarewartung).“

Die Wartungskosten im Flugzeugbau sind ein Bestandteil der DOC. Sie setzen sich wiederum aus der Wartung der Zelle und der Wartung an den Triebwerken zusammen.

Unterschieden kann nach (**Scholz 1999**) zwischen:

- Geplanten und ungeplanten Wartungsarbeiten
- Wartungsarbeiten direkt am Flugzeug und Wartungsarbeiten an ausgebauten Komponenten
- Zeitabhängige Wartungsarbeiten (steigen bei langen Flügen)
- Zyklusabhängige Wartungsarbeiten (steigen bei vielen kurzen Flügen)
- Direkte (durch das Flugzeug verursacht) und indirekte (durch Betrieb der Wartungsorganisation) Wartungskosten

Hierzu schreibt **Scholz 1999** folgendes:

Die Wartungskosten C_M setzen sich Grundsätzlich aus zwei Bestandteilen zusammen: Den Personalkosten C_{ML} und den Materialkosten C_{MM} .

$$C_M = C_{ML} + C_{MM} \quad (2.5)$$

Auch hier kann wieder zwischen direkten und indirekten Wartungskosten Unterschieden werden. Direkte Wartungskosten (DMC) werden durch das Flugzeug an sich verursacht. Indirekte Wartungskosten (IMC) werden durch den Betrieb der Wartungsorganisation verursacht und können dem einzelnen Flugzeug nicht direkt zugeordnet werden. DMC und IMC müssen bei den Wartungskosten betrachtet werden und beeinflussen den Stundensatz der Personalkosten.

Es ist auch möglich die Wartungskosten nach den Wartungsstunden zu berechnen.

Wichtige Faktoren bei der Berechnung der Wartungskosten pro Jahr $C_{M,a}$ sind:

$t_{M,a}$	benötigte Stunden zur Wartung
$L_{M,h}$	Stundenlohn
$C_{MM,a}$	Materialkosten pro Jahr

Bezieht man sich bei den Wartungskosten auf die Flugzeit $C_{M,f}$ sind folgende Faktoren wichtig:

$n_{fl,a}$	Flüge pro Jahr
t_{fl}	Flugzeit
L_M	Stundenlohn
$C_{M,f}$	Wartungskosten pro Flugstunde
C_{MM}	Materialkosten

Daraus ergeben sich dann folgende Formeln.

$$C_{M,a} = t_{M,a} \cdot L_M + C_{MM,a} \quad (2.6)$$

$$C_{M,f} = C_{M,f} \cdot L_M + C_{MM,f} \quad (2.7)$$

$$C_{M,a} = (C_{M,f} \cdot L_M + C_{MM,f}) \cdot t_f \cdot n_{t,a} \quad (2.8)$$

3 Zu vergleichende zivile Passagierflugzeuge

Die Daten aus Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 wurden für die weiteren Berechnungen verwendet. Dabei stellt Tabelle 3.1 die Daten der ausgewählten Langstreckenpassagierflugzeuge dar und Tabelle die Daten der ausgewählten Mittelstreckenpassagierflugzeuge dar.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen wurden Flugzeuge mit ähnlichen Dimensionen ausgewählt. Dies bedeutet, dass die äußeren Abmaße, die Passagieranzahl und das Leergewicht in etwa gleich ist. Natürlich gibt es zum Teil größere Unterschiede, die die Berechnung und Vergleichbarkeit der Wartungskosten natürlich beeinflusst.

Tabelle 3.1 Daten ausgewählter Langstreckenpassagierflugzeuge

Merkmal	Flugzeugtyp				
	A330-300	A340-300	DC8-73	MD11-ER	TriStar
Spannweite [m]	60,3	60,3	45,23	51,66	50,09
Länge [m]	63,6	63,6	57,12	58,65	50,05
Pax	295	295	259	320	246
Triebwerk	GE CF6-80E1A3	CFM Intl CFM56 5C4/1	DC8-73 CFM56-2C1	MD11-ER CF6-80C2	TriStar RR RB211 -524B
Reichweite [km]	10.501	13.699	8334	13410	9900
Erstflug	1992	1991	1981	1990	1978
t_f [h]	8	8	8	8	8
$n_{t,a}$ [h]	730	730	730	730	730
m_{OE} [kg]	173000	181000	75387	132050	111000
$P_{delivery}$ [US\$] in 2017	236904325	252839593,5	10099811,4	230000000	31659946,2
$P_{delivery}$ der Quelle	223000000 (2011)	238000000 (2011)	1950000 pound (1956)	Angenommen er Preis, an A330 orien- tiert	20000000US\$ (1972)
m_E [kg]	5092	2572	2110	4472	4452
$T_{T/O, E}$ [N]	304900	151200	98000	274000	240000
n_E	2	4	4	3	3
k_E	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
k_{thr}	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
BPR	5,3	6,4	6	5,31	5
OAPR	34,8	39,2	31,3	32	29
n_c	19	14	13	19	14
n_s	2	2	2	2	2
$L_{M,h}$ [US\$]	82,75	82,75	82,75	82,75	82,75
Ma	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
E [km]	7500	7500	7500	7500	7500
Z [Jahre]	10	10	10	10	10
m_{ZF} [kg]	175000	183000	104780	181440	153310
$m_{T/O}$ [kg]	242000	276500	161025	286000	231500
t_s [h]	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
TFL [m]	3200	3800	4115	4000	3800
TFR [m]	3500	4000	3800	4300	4100
$m_{T/O,Max}$ [kg]	222853	234190	155396	239919	212545

Die in grau markierten Werte wurden von uns abgeschätzt, aus Mangel an auffindbaren Informationen.

Quellen für die Erstellung der Tabellen waren:

(Airbus 2017a, Airbus 2017b, Airlines 2018, Boeing 1989, McDonell Douglas 1996, Civil-Aviation 2018, EASA 2011, Hoeveler 2018, Flugzeuginfo 2017a, Flugzeuginfo 2017b, GE Aviation 2018, Inflation 2018, Wikipedia 2018a, Wikipedia 2018b, Wikipedia 2018c, Wikipedia 2017a, Wikipedia 2018d, Wikipedia 2018e, Wikipedia 2018f, Wikipedia 2018i, Wikipedia 2018j, Wikipedia 2018r)

Tabelle 3.2 Daten ausgewählter Mittelstreckenpassagierflugzeuge

Merkmal	Flugzeugtyp			
	BAE 146-30	A318	Jak-42	B737-800
Spannweite [m]	26,34	31,1	34,88	34,32
Läng [m]	31	31,44	36,38	39,5
Pax	112	125	120	160
Triebwerk	Lycoming ALF 502	Pratt & Whitney PW6122A	Iwtschenko Prog ress D-36	CFM Intl. CFM56-7B27
Reichweite [km]	3340	5750	2800	7408
Erstflug	1981	2002	1975	1997
t_f [h]	2,5	2,5	2,5	2,5
$n_{t,a}$	1825	1825	1825	1825
m_{OE} [kg]	25640	39500	34500	41413
$P_{delivery}$ [US\$] in 2017	37883097,93	69052830,15	33671307,81	98100000
Kosten der Quelle	11000000 Pound (1981)	65000000US\$ (2011)	33000000US\$ (2015)	98.100.000 US\$ (2017)
m_E [kg]	624	2449	3939	2370
$T_{T/O, E}$ [N]	31100	98300	63750	121400
n_E	4	2	3	2
k_E	1,15	1,15	1,15	1,15
k_{thr}	1	1,18	1	1,18
BPR	5,7	5	5,6	5,1
OAPR	13,8	26,1	20	32,7
n_c	10	11	14	13
n_s	2	2	3	2
$L_{M,h}$ [US\$] in 2 0 1 7	82,75	82,75	82,75	82,75
Ma	0,8	0,8	0,8	0,8
E [km]	1600	1600	1600	1600
Z [Jahre]	8	8	8	8
m_{ZF} [kg]	37421	54500	42000	62732
$m_{T/O}$ [kg]	44225	68000	57000	79016
t_s [h]	2,4	2,4	2,4	2,4
TFL [m]	2000	2000	1800	2600
TFR [m]	2800	2800	2500	4000
$m_{T/O,Max}$ [kg]	40680	58257	50571	66249

Die in grau markierten Werte wurden von uns abgeschätzt, aus Mangel an auffindbaren Informationen.

Quellen für die Erstellung der Tabellen waren:

(Airbus 2018, Aircraftcompare 2015, Boeing 2013, EASA 2010, Steinke 2017, Flugzeuginfo 2017c, Inflation 2018, IPFS 2016, Wikipedia 2017a, Wikipedia 2018d, Wikipedia 2017b, Wikipedia 2018g, Wikipedia 2018h, Wikipedia 2018k, Wikipedia 2018l, Wikipedia 2018m, Maierhofer 2015)

4 Wartungskosten nach DOC-Methoden

Zur Berechnung der DOC, welche auch die Wartungskosten enthalten gibt es verschiedene Methoden. Aber nicht alle Methoden sind heutzutage noch zu gebrauchen oder für die Berechnung der Wartungskosten am Triebwerk geeignet.

Methoden zur DOC Rechnung werden von Fluggesellschaften und Herstellern zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit genutzt. So gibt es verschiedene Methoden von Herstellern und Flugzeugbetreibern.

Betrachtet werden die folgenden Methoden:

- Association of European Airlines (AEA) Methode aus dem Jahr 1989 (**AEA 1989**)
- Methode nach Jenkinson, die sich auf das Jahr 1994 bezieht (**Jenkinson 1999**)
- Methode nach Torbeck, TU Berlin (TUB-Methode), die sich auf das Jahr 2013 bezieht (**Thorbeck 2013**)
- Methode der Air Transport Association (ATA), die sich auf das Jahr 1967 bezieht (**ATA 1967**)
- Methode der Deutschen Lufthansa (DLH), die sich auf das Jahr 1980 bezieht (**DLH 1980**)
- Methode von Airbus Industrie (AI), die sich auf das Jahr 1989 bezieht (**AI 1989**)

Da die Methoden sich auf unterschiedliche Jahre beziehen werden die angegebenen Lohnkosten $C_{M,L}$ mit dem Inflationsfaktor k_{inf} auf das Jahr 2017 umgerechnet. Dies gilt auch für die Flugzeugpreise, welche sich zum Teil auf weit vergangene Jahre beziehen, da diese nicht mehr produziert werden.

Dabei wurden die Inflationswerte einheitlich auf die deutsche Wirtschaft bezogen was zu Abweichung des Preises eines in ehemals England oder den USA verkauften Flugzeuge führen kann.

Tabelle 4.1 Teil(I) Inflation der deutschen Wirtschaft (**Inflation 2018**)

Jahr	Inflationsfaktor $k_{inf,a}$ in Prozent
1956	1,83
1957	2,10
1958	1,18
1959	0,0233
1960	0,0057
1961	2,82
1962	2,75
1963	3,48
1964	2,33
1965	3,79
1966	2,92
1967	0,71
1968	2,11

Tabelle 4.1(Teil II) Inflation der deutschen Wirtschaft (**Inflation 2018**)

Jahr	Inflationsfaktor $k_{inf,a}$ in Prozent
1969	2,07
1970	4,05
1971	5,41
1972	6,37
1973	7,92
1974	5,72
1975	5,41
1976	3,69
1977	3,41
1978	2,54
1979	5,4
1980	5,54
1981	6,69
1982	4,55
1983	2,71
1984	1,95
1985	1,57
1986	0,99
1987	1,01
1988	1,88
1989	3,04
1990	2,74
1991	5,75
1992	3,33
1993	4,3
1994	2,45
1995	1,51
1996	1,49
1997	2,07
1998	0,36
1999	1,19
2000	2,0
2001	1,61
2002	1,14
2003	1,12
2004	2,22
2005	1,42
2006	1,39
2007	3,17
2008	1,13
2009	0,81
2010	1,31
2011	1,98
2012	2,04
2013	1,42
2014	0,19
2015	0,28
2016	1,68
2017	1,65

Zur Berechnung des aktuellen Werte wurde die Formel 4.1 verwendet. Dabei wurde p_{INF} berechnet mit:

$$p_{INF} = \sqrt[\frac{1}{\sum n_a}]{\prod_{a_{start}}^{a_{2017}} k_{inf,a}} = \sqrt[\frac{1}{\sum n_a}]{k_{inf,Startjahr} \cdot k_{inf,Startjahr+1} \cdot \dots \cdot k_{inf,2017}} \quad (4.1)$$

Mit Hilfe von Formel 4.18 wurden die Inflationsfaktoren k_{inf} mit p_{inf} berechnet. Mit den in Tabelle 4.1 gegebenen Werte ergeben sich beispielhaft folgende Werte:

Tabelle 4.2 Errechnete Inflationsfaktoren der deutschen Wirtschaft k_{inf}

Zeitraum	k_{INF}
1994-2017	1,26
1956-2017	1,86
2011-2017	1,06
1972-2017	1,58
1981-2017	1,44
2015-2017	1,02
1999-2017	1,2
1967-2017	1,67
1980-2017	1,46
1988-2017	1,34

Die Werte aus Tabelle 4.1 wurden anschließend in Formel 4.1 eingesetzt.

Bei angegebenen Preisen in einer anderen Währung wurde der Preis vorher in dem entsprechenden Jahr in US\$ umgerechnet und anschließend über Formel 4.1 und Formel 4.18 auf den Wert im Jahr 2017 berechnet.

Bei den verwendeten Formeln lassen sich die Einheiten der Ergebnisse zum Teil nicht wie bei physikalisch korrekten Formeln herauskürzen. Daher wird an dieser Stelle angegeben in welchen Einheiten einzusetzen ist und welche Einheiten als Ergebnis resultieren. Die benutzen Formeln wurden zum Teil so verändert, dass die eingesetzten Einheiten einheitlich sind.

Bei den Werten die bekannt sein müssen, siehe Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2, wird genau in den Einheiten eingesetzt, wie sie in den Tabellen benannt sind. Prozentzahlen, wie sie zum Beispiel in Tabelle 4.1 zu finden sind, sind als Dezimalzahlen einzugeben.

Ergebnisse wie Kosten werden in US\$ pro genannter Einheit (zum Beispiel Flug oder Flugstunde) errechnet. Zeiten werden in Stunden errechnet. Massen werden in Kilogramm eingesetzt und als Ergebnis errechnet. Faktoren sind einheitenlos.

4.1 Berechnung nach der AEA-Methode

4.1.1 Herleitung der Berechnung nach der AEA-Methode

Die DOC Methode nach der Association of European Airlines (**AEA 1989**) beinhaltet auch einen Teil zur Berechnung der Wartungskosten. Diese lassen sich grob in vier Kosten einteilen. Es wird in Wartungskosten für die Zelle (Airframe (AF)) und Wartungskosten für das Triebwerk (Engine (E)) unterschieden. Für beide Bereiche werden die Material- und Personalkosten berechnet.

Durch die Wahl des Stundenlohns und des Flugzeugpreises passt sich diese Methode immer den finanziellen Verhältnissen an, aus dem die genannten Preise stammen. Die Gesamtwartungskosten pro Flugstunde $C_{M,f}$ setzen sich dann aus den Wartungskosten der Zelle durch das Personal pro Flugstunde $C_{M,L,AF,f}$, den Wartungskosten des Triebwerks durch das Personal pro Flugstunde $C_{M,L,E,f}$, den Wartungskosten der Zelle für das Material pro Flugstunde $C_{MM,AF,f}$ und den Wartungskosten des Triebwerks für Material pro Flugstunde $C_{MM,E,f}$ zusammen. (**Scholz 1999**)

Nachfolgend wird das Berechnungsverfahren der AEA-Methode nach **Scholz 1999** dargestellt, wobei **AEA 1989** und **Scholz 1999** mathematisch identisch sind aber von den Formelzeichen und Indizes zum besseren Verständnis angepasst wurden.

$$C_{M,f} = C_{M,AF,L,f} + C_{M,E,L,f} + C_{MM,AF,f} + C_{MM,E,f} \quad (4.2)$$

$C_{M,f}$ = Wartungskosten pro Flugstunde

Mit den einfachen Parametern aus dem Flugzeugentwurf können die einzelnen Komponenten der Gesamtwartungskosten bestimmt werden.

Folgende Parameter müssen bekannt sein:

- t_f Flugzeit
- $n_{fl,a}$ Anzahl Flüge/ Jahr
- m_{OE} Masse Operating Empty
- $P_{delivery}$ Auslieferungspreis Flugzeug
- m_E Gewicht eines Triebwerks ohne Anbauteile zur Integration
- $T_{T/O, E}$ Startschub eines Triebwerks
- n_E Triebwerksanzahl
- $k_{E,B}$ Triebwerksfaktor Bauart
- $k_{E,thr}$ Triebwerksfaktor Schubumkehr
- BPR Nebenstromverhältnis
- OAPR Gesamtdruckverhältnis (overall pressure ratio)

- n_c Anzahl Verdichterstufen (einschließlich Fan)
- n_s Anzahl der Wellen im Triebwerk
- $L_{M,h}$ Stundensatz bezogen auf eine Wartungsstunde

Berechnung der Wartungskosten der Zelle durch das Personal $C_{M,L,AF,f}$

Mit

$$C_{M,AF,L,f} = t_{M,AF,f} \cdot L_{M,h} \quad (4.3)$$

Mit der Berechnung der Wartungsstunden für die Zelle pro Flugstunde $t_{M,AF,f}$

$$t_{M,AF,f} = \frac{1}{t_f} \left(9 \cdot 10^{-5} \cdot m_{AF} + 6,7 - \frac{350000}{m_{AF} + 75000} \right) (0,8 h + 0,68 t_f) \quad (4.4)$$

Mit

$$m_{AF} = m_{OE} - m_{E,inst} \quad (4.5)$$

Mit

$$m_{E,inst} = k_E \cdot k_{thr} \cdot n_E \cdot m_E \quad (4.6)$$

$m_{E,inst} = k_E \cdot k_{thr} \cdot n_E \cdot m_E$		(10.14)
$k_E = 1.16$	für einmotorige Propellerflugzeuge,	
$k_E = 1.35$	für mehr-motorige Propellerflugzeuge,	
$k_E = 1.15$	für strahlgetriebene Passagierflugzeuge mit Triebwerken in Gondeln,	
$k_E = 1.40$	für Flugzeuge mit eingebauten Triebwerken (buried engines)	
$k_{thr} = 1.00$	ohne Schubumkehr (reverse thrust),	
$k_{thr} = 1.18$	mit Schubumkehr,	
n_E	Anzahl der Triebwerke,	
m_E	Masse eines Triebwerks ohne Anbauteile zur Triebwerksintegration.	

Bild 4.1 Triebwerksfaktoren (Scholz 1999)

Berechnung der Wartungskosten des Triebwerks durch das Personal $C_{M,E,L,f}$

Mit

$$C_{M,E,L,f} = t_{M,E,f} \cdot L_{M,h} \quad (4.7)$$

Mit der Berechnung der Wartungsstunden für das Triebwerk pro Flugstunde $t_{M,E,f}$

$$t_{M,E,f} = n_E \cdot 0,21 \cdot k_1 \cdot k_3 (1 + 1,02 \cdot 10^{-4} \cdot T_{T/O,E})^{0,4} \left(1 + \frac{1,3}{t_f} \right) \quad (4.8)$$

Mit

$$k_1 = 1,27 - 0,2BPR^{0,2} \quad (4.9)$$

$$k_3 = 0,032n_c + k_4 \quad (4.10)$$

Mit

$$k_4 = \begin{cases} 0,50 & \text{für } n_s = 1 \\ 0,57 & \text{für } n_s = 2 \\ 0,64 & \text{für } n_s = 3 \end{cases} \quad (4.11)$$

Berechnung der Wartungskosten der Zelle für das Material $C_{MM,AF,f}$

Mit

$$C_{MM,AF,f} = \frac{1}{t_f} (4,2 \cdot 10^{-6} + 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot t_f) P_{AF} \quad (4.12)$$

Mit

$$P_{AF} = P_{delivery} - n_E \cdot P_E \quad (4.13)$$

$$P_{AF} = (0,8P_{delivery}) - P_E \quad (4.14)$$

Dabei ist die 0,8 bei Formel 4.14 der angenommene Faktor, um den der Listenpreis beim Kauf reduziert wird.

Mit

$$P_E = 293 \text{ US\$} \cdot (T_{T/O,E})^{0,81} \quad (4.15)$$

Berechnung der Wartungskosten des Triebwerks für Material $C_{M,M,E,f}$

Mit

$$C_{MM,E,f} = n_E \cdot 2,56 \frac{\text{US\$}}{h} k_1 (k_2 + k_3) (1 + 1,02 \cdot 10^{-4} T_{T/O,E})^{0,8} \left(1 + \frac{1,3}{t_f}\right) k_{INF} \quad (4.16)$$

Mit Formel 4.9, 4.10 und 4.11 sowie

$$k_2 = 0,4 \left(\frac{\text{OAPR}}{20}\right)^{1,3} + 0,4 \quad (4.17)$$

$$k_{INF} = (1 + p_{INF})^{n_a - n_{method}} \quad (4.18)$$

Die jährlichen Gesamtwartungskosten erhält man mit der Multiplikation mit der Flugzeit multipliziert mit der Anzahl der Flüge pro Jahr. Oder alternativ mit der Addition der vier

Komponenten (Formel 4.3, 4.7, 4.12 und 4.16) der Wartungskosten pro Flugstunde mit der Flugzeit multipliziert mit der Anzahl der Flüge pro Jahr.

$$C_{M,a} = C_{M,f} \cdot t_f \cdot n_{f,a} \quad (4.19)$$

4.1.2 Ergebnisse der AEA-Methode

Die Ergebnisse der AEA-Methode für die gesamten Wartungskosten pro Flugstunde sind im Bild 4.2 und 4.3 dargestellt.

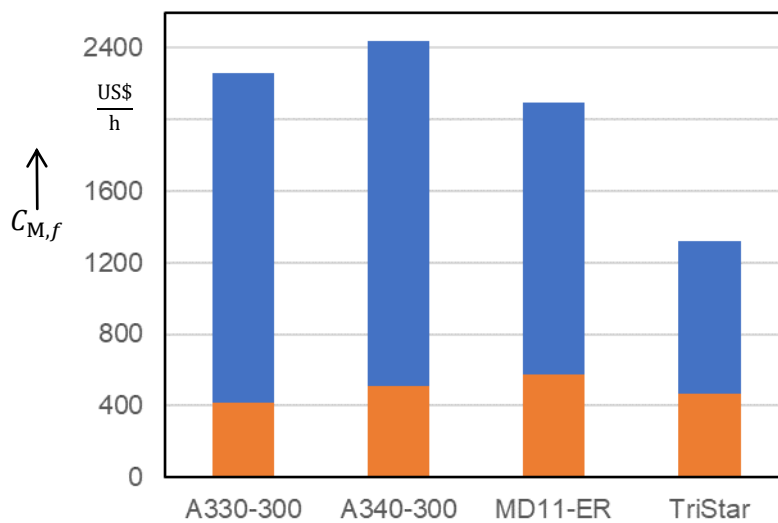


Bild 4.2 Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der AEA-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
- Triebwerkswartungskosten pro FH

In Bild 4.2 ist nicht klar erkennbar, wie die Triebwerkswartungskosten mit der Anzahl der Triebwerke zusammenhängen, da die beiden Dreistrahler höhere Triebwerkswartungskosten besitzen als die Airbus Flugzeuge. Der vierstrahlige A340 besitzt jedoch höhere Wartungskosten als der zweistrahlige A330.

Die Airframewartungskosten sind bei den Dreistrahlern deutlich niedriger wodurch die gesamten Wartungskosten auch geringer ausfallen. Bei dem A340 überwiegen die Airframewartungskosten deutlich denen des A330.

Der Vergleich des A340 und des A330 ist sehr repräsentativ, da die Preise des Flugzeugs aus dem gleichen Jahr stammen und vom gleichen Hersteller produziert wurden. Durch die zeitliche Nähe des Erstfluges kann auch von einem ähnlichen Stand der Technik ausgegangen werden. Diese Gesichtspunkte machen diesen Vergleich sehr interessant.

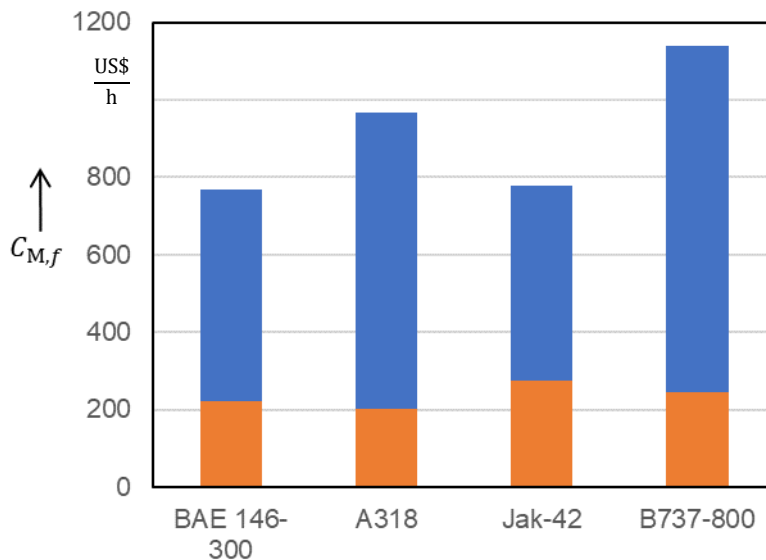


Bild 4.3 Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach der AEA-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
 - Triebwerkswartungskosten pro FH

Bei den Mittelstreckenflugzeugen des Bildes 4.3 hat die dreistrahlige Jak-42, auch Yak-42, die höchsten Triebwerkswartungskosten, an zweiter Stelle liegt die zweistrahlige B737 gefolgt von der vierstrahligen BAe146. Der A318 besitzt die geringsten Triebwerkswartungskosten.

Im Gegensatz zum Bild 4.2 besitzen bei den Mittelstreckenflugzeugen Flugzeuge mit mehr Triebwerken geringer Airframewartungskosten als die zweistrahligen Varianten. Die B737 schneidet im Vergleich zum A318 deutlich schlechter ab.

Die Gesamtwartungskosten sind geringer, je mehr Triebwerke das Mittelstreckenflugzeug besitzt. Generell sind die Wartungskosten bei den Mittelstreckenflugzeugen geringer als bei den Langstreckenflugzeugen.

Bei den Triebwerkswartungskosten sind es etwas weniger als die Hälfte. Eine Ausnahme bildet die B737 bei der Airframewartungskosten höher sind als bei der TriStar. Ältere Flugzeuge schneiden prinzipiell besser ab als moderne Konkurrenten.

4.1.3 Auswertung der Ergebnisse der AEA-Methode

Bei der AEA-Methode hängen die Triebwerkskosten hauptsächlich von der Komplexität und der Größe des Triebwerkes ab. Die Anzahl spielt auch eine Rolle, geht jedoch nur als Faktor ein. Da jedoch Flugzeuge mit mehr Triebwerken ein geringeres Schubgewichtsverhältnis aufweisen müssen, wird die Anzahl der Triebwerke hier fast vollständig kompensiert.

Die deutlich geringeren Wartungskosten der älteren Flugzeuge sind darauf zurückzuführen, dass die Kaufpreise früher deutlich geringer waren als heutige Flugzeuge kosten. Der Ansatz, dies über den Inflationsfaktor auszugleichen wird dadurch nicht vollständig ermöglicht. Es entstehen durch Formel 4.13 sehr geringe Triebwerks- und Airframekosten was sich im Laufe der Berechnung als wartungstechnischen Vorteil erweist.

4.2 Berechnung nach Jenkinson

4.2.1 Herleitung der Berechnung

Mit der Methode nach **Jenkinson 1999** ist eine schnelle und grobe Abschätzung der Wartungskosten möglich. Die Gesamtwartungskosten werden wie schon bei der AEA-Methode in Wartungskosten für die Zelle und Wartungskosten für die Triebwerke aufgeteilt. Die Methode ist für Triebwerke mit einem Nebenstromverhältnis von etwa 5 ausgelegt (**Scholz 1999**).

Mit folgenden Parametern lassen sich die Wartungskosten nach dem Skript von **Scholz 1999** berechnen:

- n_E *Triebwerksanzahl*
- t_b *Blockzeit*
- m_{OE} *Masse Operating Empty*
- $T_{T/O}$ *Startschub eines Triebwerks*
- $n_{f,a}$ *Anzahl Flüge/ Jahr*

Die Gleichungen gelten für das Jahr 1994 und müssen noch mit dem Inflationsfaktor k_{INF} korrigiert werden.

Die jährlichen Gesamtwartungskosten $C_{M,b,a}$ bezogen auf die Blockzeit t_b berechnen sich wie folgt:

$$C_{M,b,a} = (C_{M,AF,b} + n_E \cdot C_{M,E,L,b}) t_b \cdot n_{t,a} \quad (4.20)$$

Mit den Wartungskosten für die Zelle bezogen auf die Blockzeit $C_{M,AF,b}$

$$C_{M,AF,b} = k_{INF} \left(175 \frac{US\$}{h} + 0,0041 \frac{US\$}{h} m_{OE} \right) \quad (4.21)$$

Und mit den Wartungskosten für ein Triebwerk bezogen auf die Blockzeit $C_{M,E,L,b}$

$$C_{M,E,L,b} = 0,00029 \frac{US\$}{h} T_{T/O} \cdot k_{INF} \quad (4.22)$$

Die oben genannten Formeln 4.20 bis 4.22 beziehen sich auf die Blockzeit t_b . Um einen Vergleich mit der AEA-Methode durchführen zu können müssen die Wartungskosten auf die Flugzeit umgerechnet werden und der Parameter Flugzeit t_f um ein Delta t ergänzt werden.

$$t_b = \Delta t + t_f \quad (4.23)$$

Dieses Δt hängt davon ab ob es sich um einen Kurz-/Mittelstreckenflug oder einen Langstreckenflug handelt. nach AEA1989

$$\Delta t = \begin{cases} 0,25h \text{ für Kurz – und Mittelstrecke} \\ 0,42h \text{ für Langstrecke} \end{cases} \quad (4.24)$$

Für Kurz-/Mittelstrecke sind es 15 Minuten und für die Langstrecke 25 Minuten. Da Kurz- und Mittelstreckenflüge häufig die kleineren Flughäfen anfliegen wird davon ausgegangen, dass die Zeit am Boden deswegen kürzer als von Langstreckenflügen ist, welche eher größere Flughäfen anfliegen und dementsprechend mehr Zeit für das Taxing brauchen.

Die Umrechnung von Wartungskosten bezogen auf die Blockzeit auf Wartungskosten bezogen auf die Flugzeit sind folgende Formeln zu verwenden:

$$C_{M,f} = C_{M,b,a} \left(\frac{t_b}{t_f} \right) \quad (4.25)$$

Dies beruht auf dem selbstgewählten Ansatz das die Gesamtkosten sich auf Flugzeit und Blockzeit beziehen können

$$C_{M,f,a} \cdot t_f = C_{M,b,a} \cdot t_b \quad (4.26)$$

$$C_{M,AF,f} = C_{M,AF,b} \left(\frac{t_b}{t_f} \right) \quad (4.27)$$

$$C_{M,L,f} = C_{M,L,b} \left(\frac{t_b}{t_f} \right) \quad (4.28)$$

4.2.2 Ergebnisse nach Jenkinson

Die Ergebnisse der Methode nach Jenkinson für die gesamten Wartungskosten pro Flugstunde sind im Bild 4.4 und 4.5 dargestellt.

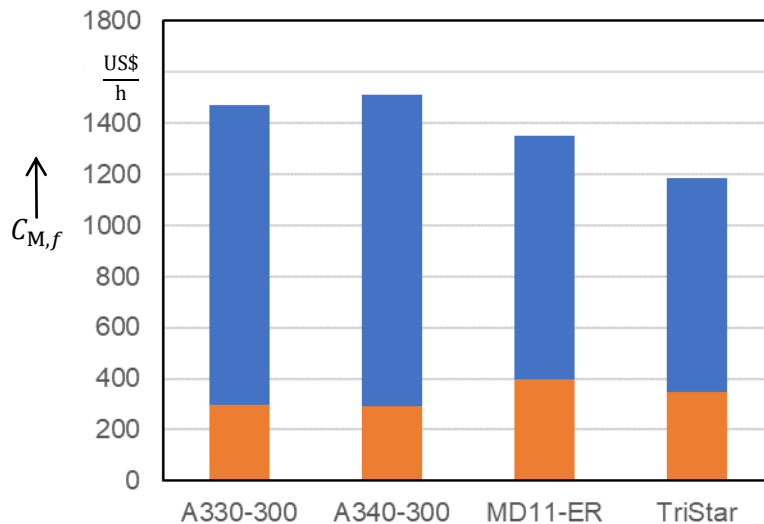


Bild 4.4 Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach Jenkinson

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
- Triebwerkswartungskosten pro FH

In Bild 4.4 liegt ein ähnliches Bild vor, wie bei der AEA-Methode. Es ist nicht klar erkennbar, wie die Triebwerkswartungskosten mit der Anzahl der Triebwerke zusammenhängen, da die beiden Dreistrahler höhere Wartungskosten besitzen als die Airbus Flugzeuge. Der A340 und der A330 unterscheiden sich kaum.

Die Airframewartungskosten sind bei den Dreistrahlern erneut deutlich niedriger wodurch die gesamten Wartungskosten auch geringer ausfallen. Bei dem A340 überwiegen die Airframewartungskosten deutlich denen des A330.

Die gesamten Wartungskosten sind bei den Airbus Flugzeugen höher als bei den Dreistrahlern.

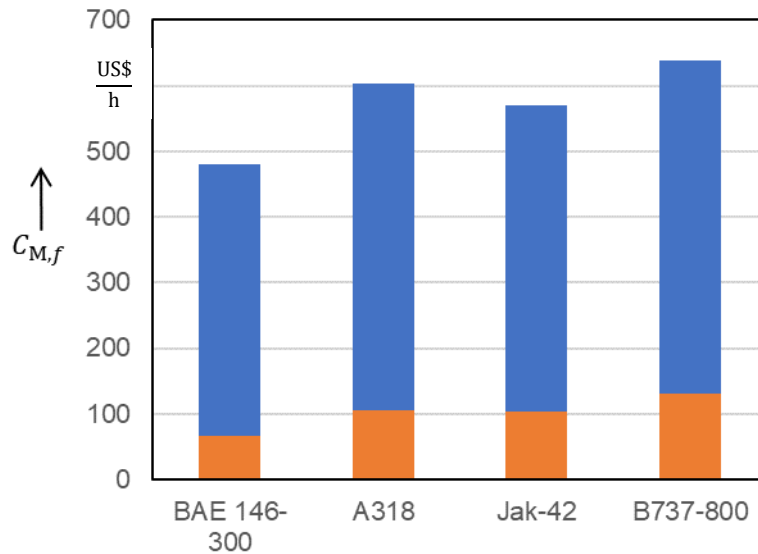


Bild 4.5 Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach Jenkinson

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
 - Triebwerkswartungskosten pro FH

Bei den Mittelstreckenflugzeugen des Diagramms 4.5 haben die Flugzeuge mit weniger Triebwerken höhere Triebwerkswartungskosten als die Drei- oder Zweistrahler. Die Jak-42 liegt ungefähr auf dem gleichen Niveau wie der A318, bei der B737 sind die Kosten ungefähr doppelt so hoch wie bei der BAE146.

Bei den Airframewartungskosten gibt es ein ähnliches Bild wie bei der AEA-Methode. Die BAE 146-300 und die Jak-42 schneiden besser ab als die Zweistrahler von Airbus und Boeing.

Generell betragen die Wartungskosten bei den Mittelstreckenflugzeugen zwischen ein Drittel und der Hälfte der Wartungskosten der Langstreckenflugzeuge. Bei den Triebwerkswartungskosten sind es etwas weniger als ein Drittel. Wiederholte Ausnahme bildet die B737 bei der Airframewartungskosten höher sind als bei der TriStar. Ältere Flugzeuge schneiden abermals besser ab als moderne Konkurrenten.

4.2.3 Auswertung der Ergebnisse der Methode nach Jenkinson

Bei der Methode nach Jenkinson hängen die Triebwerkskosten ausschließlich vom Schub, der Anzahl der Triebwerke ab weshalb die schubstärkeren Dreistrahler höhere Kosten aufweisen als die Airbusflugzeuge. Das gleiche gilt für die Mittelstreckenflieger.

Die Airframekosten sind ausschließlich vom Operating Empty Weight abhängig, sodass leichtere Flugzeuge günstiger zu unterhalten sind als die schwereren Flieger.

Abermals scheinen die älteren Flugzeuge geringere Gesamtwartungskosten aufzuweisen. Das liegt daran, dass sie kleiner sind. Dadurch überkompensieren die dreistrahligen Langstreckenflieger MD11 und TriStar ihren Nachteil bei den Triebwerkswartungskosten.

4.3 Berechnung nach der TUB-Methode

4.3.1 Herleitung der Berechnung nach der TUB-Methode

Die Methode der TU-Berlin wurde von der Technischen Universität Berlin (**Thorbeck 2013**) entwickelt. Mit der Methode lassen sich die Gesamtwartungskosten pro Flugzyklus $C_{M,fl}$ aus den Wartungskosten der Zelle für Material pro Flugzyklus $C_{MM,AF,fl}$, den Wartungskosten der Zelle für Personal pro Flugzyklus $C_{M,AF,L,fl}$ und den Wartungskosten des Triebwerks pro Flugzyklus $C_{M,E,t}$ berechnen.

Folgende Parameter müssen bekannt sein:

- t_f Flugzeit
- $n_{f,a}$ Anzahl Flüge/ Jahr
- m_{OE} Masse Operating Empty
- $T_{T/O,E}$ Startschub eines Triebwerks
- n_E Triebwerksanzahl
- B Burden

Nachfolgend werden die Wartungskosten nach **Thorbeck 2013** berechnet.

$$C_{M,fl} = C_{MM,AF} + C_{M,AF,L} + C_{M,E} \quad (4.29)$$

Mit den Wartungskosten der Zelle für Material pro Flugzyklus $C_{MM,AF,fl}$

$$C_{MM,AF,fl} = \frac{m_{OE}}{1000} \cdot (0,21 \cdot t_f + 13,7) + 57,5 \quad (4.30)$$

Und den Wartungskosten der Zelle für Personal pro Flugzyklus $C_{M,AF,L,fl}$

$$C_{M,AF,L,fl} = L_M(1 + B) \left\{ \left(0,655 + 0,01 \cdot \frac{m_{OE}}{1000} \right) t_f + 0,254 + 0,01 \cdot \frac{m_{OE}}{1000} \right\} \quad (4.31)$$

Burden wurde in der Berechnung nach dem Vorschlag von **Thorbeck 2013** mit 2 angenommen und beinhaltet noch die fixen Wartungskosten, sowie die Verwaltungskosten.

Und den Wartungskosten des Triebwerks pro Flugzyklus $C_{M,E,t}$

$$C_{M,E,fl} = n_E \left(1,5 \cdot \frac{T_{T/O,E}}{1000} + 30,5 \cdot t_f + 10,6 \right) \quad (4.32)$$

Um die Wartungskosten mit den Wartungskosten der anderen Methoden vergleichen zu können werden die Wartungskosten pro Flugzyklus in Wartungskosten pro Flugstunde umgerechnet.

$$C_{M,f} = \frac{C_{M,fl}}{t_f} \quad (4.33)$$

$$C_{MM,AF,f} = \frac{C_{MM,AF,fl}}{t_f} \quad (4.34)$$

$$C_{M,AF,L,f} = \frac{C_{M,AF,L,fl}}{t_f} \quad (4.35)$$

$$C_{M,E,f} = \frac{C_{M,E,fl}}{t_f} \quad (4.36)$$

4.3.2 Ergebnisse der TUB-Methode

Die Ergebnisse der TUB-Methode (Thorbeck 2013) für die gesamten Wartungskosten pro Flugstunde sind im Bild 4.6 und 4.7 dargestellt.

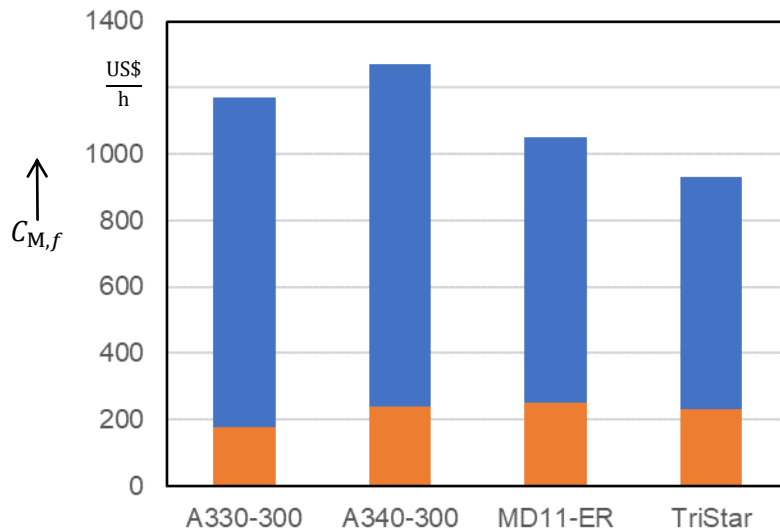


Bild 4.6 Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der TUB-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
 - Triebwerkswartungskosten pro FH

In Bild 4.6 liegt ein ähnliches Bild vor, wie bei der AEA-Methode. Es ist keine Abhängigkeit der Triebwerksanzahl zu Triebwerkswartungskosten erkennbar. Der A330 weist die geringsten Triebwerkskosten auf, gefolgt vom dreistrahligen TriStar sowie der größeren MD-11ER. Der A340 weist die höchsten Triebwerkswartungskosten auf.

Die Airframewartungskosten sind bei den Dreistrahlern deutlich niedriger wodurch die gesamten Wartungskosten auch geringer ausfallen. Bei dem A340 überwiegen die Airframewartungskosten denen des A330.

Bei den gesamten Wartungskosten kein Zusammenhang zu der Triebwerksanzahl zu erkennen.

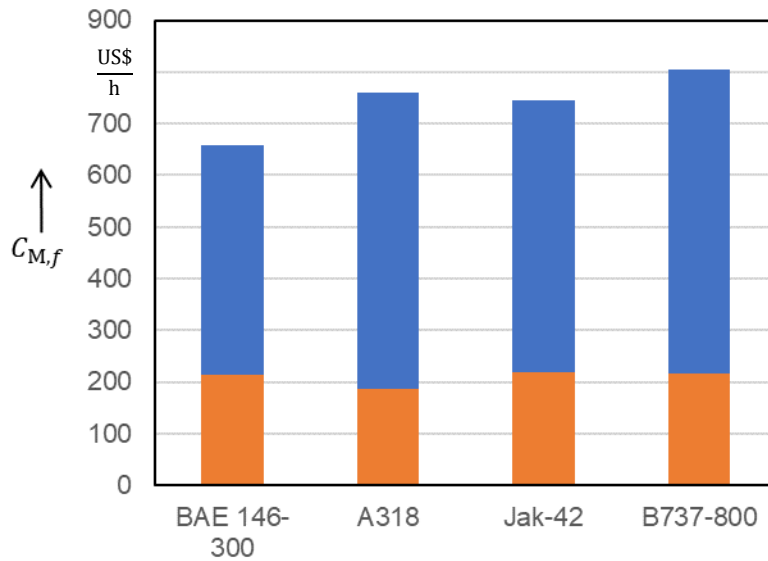


Bild 4.7 Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeuge nach der TUB-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
 - Triebwerkswartungskosten pro FH

Bei den Mittelstreckenflugzeugen des Bildes 4.7 besitzt der A318 die niedrigsten Triebwerkswartungskosten. Die anderen Flugzeuge sind nahezu identisch.

Bei den Airframewartungskosten gibt es ein ähnliches Bild wie bei der AEA-Methode und der Methode nach Jenkinson. Die BAE146 und die Jak-42 schneiden besser ab als die Zweistrahler von Airbus und Boeing.

Die gesamten Wartungskosten sind höher je weniger Triebwerke das Flugzeug besitzt.

Die Wartungskosten bei den Mittelstreckenflugzeugen entsprechen etwas mehr als die Hälfte der Wartungskosten der Langstreckenflugzeuge.

Die Triebwerkswartungskosten befinden sich auf einem ähnlichen Niveau.

Ältere Flugzeuge schneiden abermals besser ab als moderne Konkurrenten.

4.3.3 Auswertung der Ergebnisse der TUB-Methode

Bei der TUB-Methode hängen die Triebwerkskosten vom Schub, der Flugzeit und der Anzahl der Triebwerke ab. Dadurch wird der Einfluss des Schubes reduziert siehe Formel 4.32. Da der Einfluss der Flugzeit ebenfalls geringer ist wird durch die anschließende Umrechnung pro Flugstunden das Ergebnis verändert.

Die Airframewartungskosten sind hängen vom Operating Empty Weight, den Lohnkosten sowie der Flugzeit ab. Die kleinen leichteren Flugzeuge haben deutlich geringere Airframewartungskosten wodurch die sie bei den Gesamtkosten auch geringere Werte erzielen.

4.4 Berechnung nach der ATA67-Methode

4.4.1 Herleitung der Berechnung nach der ATA67-Methode

Die Methode der Air Transport Association of America (ATA 1967) kann Wartungskosten von zivilen Verkehrsflugzeugen pro zurückgelegtem Weg errechnen. Dabei gibt es unterschiedliche Formeln für die Flugzeugzelle und die Triebwerke. Weiterhin wird zwischen den Materialkosten und den Lohnkosten unterschieden. Am Ende werden die Kosten mit unterschiedlicher Gewichtung aufgrund des Burden zusammengefügt.

Folgende Parameter werden benötigt:

t_f	Flugzeit
m_{OE}	Masse Operating Empty
m_E	Masse Triebwerk
n_E	Anzahl Triebwerke
$T_{T/O, E}$	Startschub eines Triebwerks
B	Burden
Ma	Mach Zahl
E	Entfernung von Gate zu Gate inklusive Rollwege und zusätzliche Manöverstrecken
P_{AF}	Preis der Flugzeugzelle
P_E	Preis des Triebwerks

Nachfolgend wird nach ATA 1967 hergeleitet, wie sich die Wartungskosten berechnen.

Berechnung der Zeit, die zur Wartung des Airframes durch die Mechaniker pro Flugzyklus $t_{M,AF,L,fl}$ gebraucht wird:

$$t_{M,AF,L,fl} = 0,05 \frac{m_{OE} - n_E \cdot m_E}{1000} \cdot 2,205 + 6 - \left(\frac{630}{\frac{m_{OE} - n_E \cdot m_E}{1000} \cdot 2,205 + 120} \right) \quad (4.37)$$

Eigener Ansatz zur Umrechnung von Flugzyklus auf Flugzeit bezogen aus der Formel 4.33:

$$t_{M,AF,L,f} = \frac{t_{M,AF,L,fl}}{t_f} \quad (4.38)$$

Berechnung der Wartungskosten des Airframes pro Flugmeile $C_{M,AF,L,flm}$ mit dem Stundenlohn aus der Methode von 4 US\$ pro Stunde:

$$C_{M,AF,L,flm} = \frac{t_{M,AF,L,f} \cdot t_f + t_{M,AF,L,fl}}{E} \cdot 4 \frac{US\$}{h} k_{INF} \cdot \sqrt{Ma} \quad (4.39)$$

E ist die Entfernung der Flugstrecke inklusive der Rollstrecke am Boden, Für Mittelstrecke wurden 1700 km also 918 NM angenommen und für Langstrecke 7500 km also 4050 NM welche von der angenommenen Flugdauer von 2,5 h und 8h abgeleitet wurden. Für Mittelstrecke wurde $Ma = 0,8$ und für Langstrecken $Ma = 0,85$ angenommen.

Berechnung der Materialkosten für den Airframe pro Flugmeile $C_{MM,AF,flm}$:

$$C_{MM,AF,flm} = \frac{3,05 \cdot P_{AF} \cdot 10^{-6} \cdot t_f + 6,24 \cdot P_{AF} \cdot 10^{-6}}{E} \quad (4.40)$$

Berechnung der Wartungskosten der Triebwerke durch den Mechaniker pro Flugmeile $C_{M,E,L,flm}$:

$$C_{M,E,L,flm} = 4 \frac{\text{US\$}}{\text{h}} k_{\text{INF}} \frac{\{(0,6 + 0,027T_{T/O} \cdot 10^{-3}) \cdot t_f + (0,3 + 0,03T_{T/O} \cdot 10^{-3})\}n_E}{E} \quad (4.41)$$

Berechnung der Materialkosten für die Triebwerke pro Flugmeile $C_{MM,E,flm}$:

$$C_{MM,E,flm} = \frac{2,5 \cdot n_E \cdot P_E \cdot t_f \cdot 10^{-5} + 2 \cdot n_E \cdot P_E \cdot 10^{-5}}{E} \quad (4.42)$$

Zusätzlich werden die Burden mit Faktor zwei bei den Lohnkosten betrachtet, sodass insgesamt die dreifachen Lohnkosten in der Rechnung betrachtet werden. Der ursprüngliche Burdenfaktor von 1,8 wurde angepasst damit in allen Methoden ein einheitlicher Faktor verwendet wird.

Berechnung der gesamten Wartungskosten für den Airframe pro Flugstunde $C_{M,AF,f}$:

$$C_{M,AF,f} = \frac{(3 \cdot C_{M,AF,L,flm} + C_{MM,AF,flm}) \cdot E}{t_f} \quad (4.43)$$

Berechnung der gesamten Wartungskosten für die Triebwerke pro Flugstunde $C_{M,E,f}$:

$$C_{M,E,f} = \frac{(3 \cdot C_{M,E,L,flm} + C_{MM,E,flm}) \cdot E}{t_f} \quad (4.44)$$

4.4.2 Ergebnisse der ATA67-Methode

Die Ergebnisse der ATA67-Methode für die gesamten Wartungskosten pro Flugstunde sind in Bild 4.8 und 4.9 dargestellt.

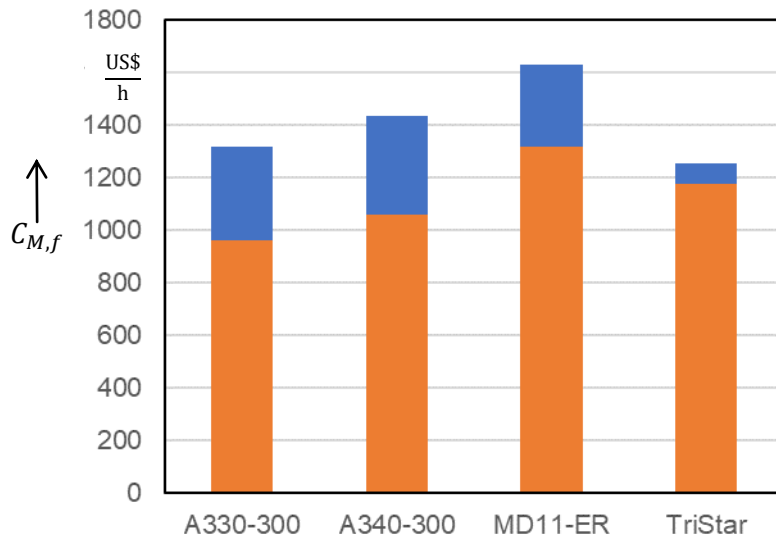


Bild 4.8 Wartungskosten von Langstreckenflugzeuge nach der ATA67-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
 - Triebwerkswartungskosten pro FH

In Bild 4.8 ist kein klarer Trend erkennbar, dass die Triebwerkswartungskosten von der Anzahl der Triebwerke abhängig sind, da die dreistrahlige MD11-ER und TriStar höhere Triebwerkswartungskosten aufweisen als die Airbusflugzeuge A330-300 und A340-300. Die Triebwerkswartungskosten sind etwa doppelt so hoch, wie bei den vorangegangenen Methoden.

Es ist jedoch erkennbar, dass der zweistrahlige A330-300 weniger Triebwerkswartungskosten hat als der vierstrahlige A340-300. Auch die Airframewartungskosten des A340-300 sind etwas höher als die des A330-300.

Die Airframewartungskosten der MD11-ER entsprechen in etwa der Triebwerkswartungskosten der A330-300 und der A340-300. Dies ist auch realistisch, da die Flugzeuge etwa die gleiche Zelle haben. Die TriStar hat die geringsten Airframewartungskosten.

Wie auch schon in den vergangenen Methoden sieht man in Bild 4.8 sehr gut, dass der A330-300 und der A340-300 sich sehr ähnlich sind und dass der A340-300 mit vier Triebwerken

auch höhere Wartungskosten hat als sein zweistrahliger A330-300. Das ist auf die ähnliche Bauart und die fast zeitgleichen Erstflüge zurückzuführen.

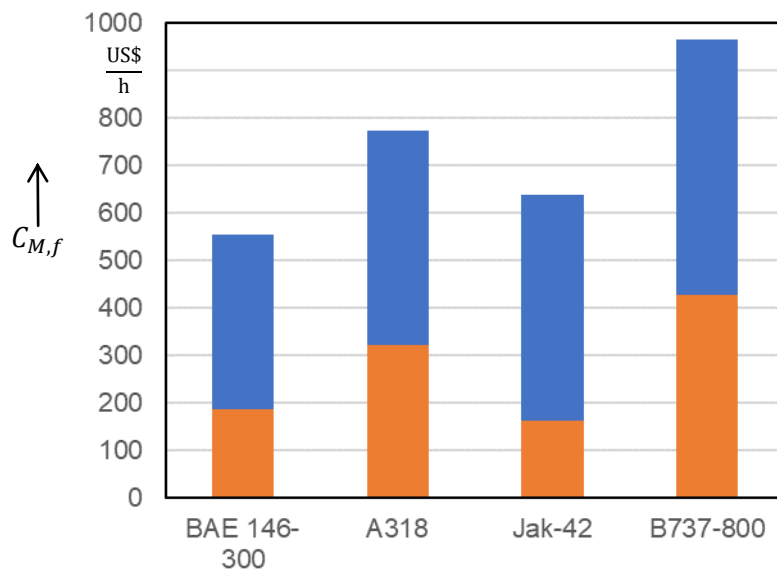


Bild 4.9 Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeuge nach der ATA67-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
■ Airframewartungskosten pro FH
■ Triebwerkswartungskosten pro FH

Bei den Mittelstreckenflugzeugen haben die beiden Zweistrahler B737-800 und A318 die höchsten Triebwerkswartungskosten. Die vierstrahlige BAE-146-300 hat höhere Triebwerkswartungskosten als die dreistrahlige Jak-42. Damit ist auch hier kein klarer Trend zu erkennen.

Die Airframewartungskosten bewegen sich untereinander etwa im selben Bereich, wobei die BAE -146-300 geringere Airframewartungskosten hat und damit als Vierstrahler die niedrigsten Gesamtkosten aufweist.

Die Triebwerkswartungskosten der ATA67-Methode sind etwa doppelt so hoch wie die Kosten der anderen DOC-Methoden, ausgenommen der AI-Methode. Ein Grund dafür sind die Lohnkosten, die um den Burden ergänzt werden. In unserm Fall steigen dadurch die Lohnkosten für Airframe und Triebwerk auf das dreifache, siehe Formel 4.43 und 4.44.

4.4.3 Auswertung der Ergebnisse der ATA67-Methode

Die Triebwerkswartungskosten hängen bei der ATA67-Methode hauptsächlich von dem Triebwerksschub, der Anzahl der Triebwerke, des Triebwerkspreises, der gewählten Flugdauer und den in dieser Methode als sehr niedrige empfundenen Lohnkosten von 4 US\$/h, ab.

Die Airframewartungskosten sind hauptsächlich abhängig vom Preis des Flugzeuges ohne Triebwerke, der gewählten Flugdauer und der Betriebsleermasse ohne Triebwerke.

Die Kosten für den Lohn werden sowohl bei den Triebwerks- als auch bei den Airframewartungskosten mit dem Faktor drei multipliziert.

4.5 Berechnung nach der DLH-Methode

4.5.1 Herleitung der Berechnung nach der DLH-Methode

Die Methode der Deutschen Lufthansa (DLH-Methode) (**DLH 1982**) ermöglichte es mit Werten wie zum Beispiel den technischen Triebwerksdaten, Material- und Arbeitsdaten, grundlegenden Flugzeugdaten sowie mit Daten des Erstfluges und des in Servicebetriebs die Wartungskosten für den Airframe und die Triebwerke zu berechnen.

Die Airframewartungskosten werden in drei Bestandteile aufgeteilt. Bestandteil 1 beschäftigt sich mit den Lohnkosten und der Anpassung an das Jahr für die Berechnung. Bestandteil 2 beschäftigt sich mit technischen Altersfaktor und Bestandteil 3 mit den Flugzeugmassen und der Flugzeit.

Die Triebwerkswartungskosten werden in Material- und Lohnkosten unterteilt. Dafür wird sich auf Materialfaktoren und den Triebwerksschub mit den genaueren Triebwerksdaten, wie in der AEA-Methode, berufen.

Folgende Parameter müssen bekannt sein:

- t_f Flugzeit
- $m_{T/O}$ Maximum Take Off Weight
- m_{OE} Masse Operating Empty
- m_{ZF} Maximum Zero Fuel Weight
- $P_{A/C}$ Preis des Flugzeugs (Airframe + Triebwerke)
- $T_{T/O, E}$ Startschub eines Triebwerks
- Z Service-Jahre seit Auslieferung
- a_{meth} Jahr auf das sich die Methode bezieht
- $a_{erstflug}$ Jahr in dem das Flugzeug den Erstflug hatte
- k_{inf} Inflationsfaktor
- n_E Triebwerksanzahl
- BPR Nebenstromverhältnis
- OAPR Gesamtdruckverhältnis (overall pressure ratio)
- n_c Anzahl Verdichterstufen (einschließlich Fan)
- n_s Anzahl der Wellen im Triebwerk
- $L_{M, h}$ Stundensatz bezogen auf eine Wartungsstunde
- k_u Währungsumrechnungsfaktor
- k_{mm} Materialaltersfaktor

Nachfolgend wird nach **DLH 1982** hergeleitet, wie sich die Wartungskosten berechnen.

Berechnung der Wartungskosten für den Airframe pro Flugstunde $C_{M,AF,f}$ mit den Bestandteilen b_1 bis b_3 der finalen Gleichung:

$$C_{M,AF,f} = 0,1799 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \quad (4.45)$$

Berechnung des Bestandteils 1 b_1 der finalen Gleichung $C_{M,AF,f}$:

$$b_1 = (L_{M,h} \cdot k_{inf} \cdot k_u)^{CSL} \cdot MPI^{CSM} \cdot m_{OE}^{0,9444} \cdot 0,995^{(a_{meth}-1980)} \quad (4.46)$$

Mit dem Kostenanteil der Arbeit CSL:

$$CSL = \frac{1}{(1 + CAM)} \quad (4.47)$$

Mit dem Kostenverhältnis Arbeit/ Material

$$CAM = 14,148 \cdot \left(\frac{L_{M,h} \cdot k_{inf} \cdot k_u}{MPI} \right) \cdot m_{OE}^{-0,5111} \cdot t_f^{0,2089} \quad (4.48)$$

Mit dem Materialpreisindex MPI:

$$MPI = \left(\frac{P_{A/C} \cdot 10^{-6}}{m_{OE}} \right) \cdot 40 \quad (4.49)$$

Mit dem Kostenanteil des Materials CSM:

$$CSM = 1 - CSL \quad (4.50)$$

Berechnung des Bestandteils 2 b_2 der finalen Gleichung $C_{M,AF,f}$:

$$b_2 = 0,5808 + 0,1757 \cdot \ln(S) + \frac{0,6217}{TM} \quad (4.51)$$

Mit dem technischen Altersfaktor TM:

$$TM = \frac{(2017 - a_{erstflug})}{S} + |Z - 2| \quad (4.52)$$

Berechnung des Bestandteils 3 b_3 der finalen Gleichung $C_{M,AF,f}$:

$$b_3 = \left(\text{CRH}/C + \frac{2}{t_{se}} + \frac{1}{(\text{CRH}/C \cdot t_s^2)} \right)^{0,5} \quad (4.53)$$

t_{se} = Sektorflugzeit:

Flugzeit vom Start (Hauptfahrwerk verlässt den Boden) bis zur Landung
(Hauptfahrwerk setzt auf)

Daher angenommene Sektorflugzeit t_{se} :

$$t_{se} = t_f - 0,1 \quad (4.54)$$

Mit dem Kostenverhältnis stündlich/ zyklisch

$$\text{CRH}/C = 1,49 \cdot \ln\left(\frac{m_{T/O}}{m_{ZF}}\right) - 0,0085 \quad (4.55)$$

Berechnung der Triebwerkswartungskosten pro Flugstunde $C_{M,E,f}$:

$$C_{M,E,f} = n_e \cdot (C_{MM,E,f} + C_{M,E,L,f}) \cdot \left(1 + \frac{1,3}{t_f}\right) \cdot k_u \quad (4.56)$$

Mit den Triebwerkswartungskosten für Material pro Flugstunde $C_{MM,E,f}$:

$$C_{MM,E,f} = \left[2,27 \cdot \left(4 + \frac{T_{T/O,E}}{9,81 \cdot 1000} \right) \cdot k_E - 4,8 \right] \cdot k_{mm} \cdot k_{te} \cdot k_{inf} \quad (4.57)$$

Mit dem Materialaltersfaktor von $k_{mm} = 0,625$.

Berechnung des Schubminderungsfaktors:

$$k_{TE} = 1 - [0,336 \cdot (1 - e^{-0,08 \cdot T_{D,tot}})] \cdot [1 - 0,165 \cdot (t_f - 1)^{0,63}] \quad (4.58)$$

Mit der totalen Schubminderung $T_{D,tot}$:

$$T_{D,tot} = T_{D,T/O} + T_{D,CL} + T_{D,CR} \quad (4.59)$$

Mit

$$T_{D,T/O} = \frac{T_{D\Delta}}{0,636 - 0,181 \cdot \ln(t_f)} \quad (4.60)$$

$$T_{D,CL} = \frac{T_{D\Delta}}{0,219 + 0,066 \cdot \ln(t_f)} \quad (4.61)$$

$$T_{D,CR} = \frac{T_{D\Delta}}{0,129 + 0,1145 \cdot \ln(t_f)} \quad (4.62)$$

$T_{D\Delta} = 2,5$ (von Prof. Scholz als Mittelwert übernommen)

$$k_E = k_1 \cdot (k_2 + k_3) \quad (4.63)$$

k_1 bis k_4 schon bekannt von der AEA Methode:

$$k_1 = 1,27 - 0,2 \cdot BPR^{0,2} \quad (4.9)$$

$$k_2 = 0,4 \cdot \left(\frac{OAPR}{20}\right)^{1,3} + 0,4 \quad (4.17)$$

$$k_3 = 0,032 \cdot n_c + k_4 \quad (4.10)$$

$$k_4 = \begin{cases} 0,50 \text{ für } n_s = 1 \\ 0,57 \text{ für } n_s = 2 \\ 0,64 \text{ für } n_s = 3 \end{cases} \quad (4.11)$$

Berechnung der Lohnkosten für die Triebwerkswartung pro Flugstunde $C_{M,E,L,f}$:

$$C_{M,E,L,f} = 0,11 \cdot \left(1 + \frac{T_{T/O,E}}{9,81 \cdot 1000}\right)^{0,7} \cdot k_5 \cdot k_{EL} \cdot k_{ML} \cdot k_{te} \cdot L_{M,h} \cdot k_{inf} \cdot k_u \quad (4.64)$$

Mit der Arbeitseffizienz DLH/USA $k_{EL} = 1,33$ sowie dem Arbeitserfahrungsfaktor $k_{ML} = 0,72$.

Mit

$$k_5 = k_1 \cdot k_3 \quad (4.65)$$

4.5.2 Ergebnisse der DLH-Methode

Die Ergebnisse der DLH-Methode für die gesamten Wartungskosten pro Flugstunde sind im Bild 4.10 und 4.11 dargestellt.

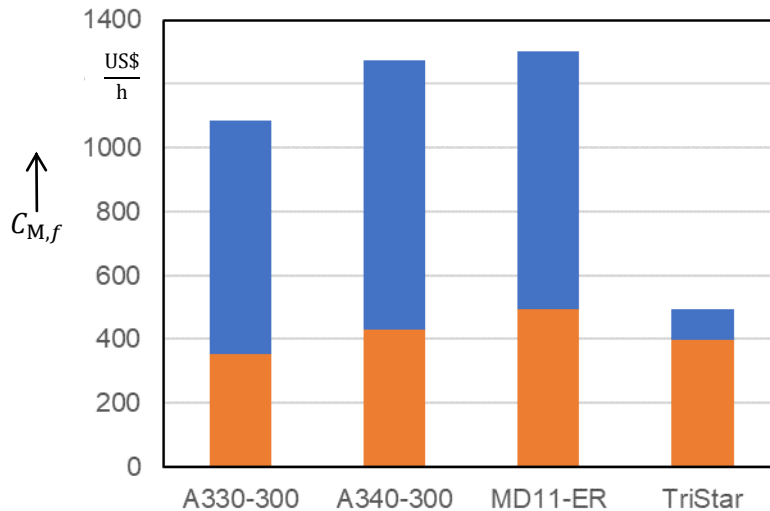


Bild 4.10 Wartungskosten von Langstreckenflugzeuge nach der DLH-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
 - Triebwerkswartungskosten pro FH

Das Bild 4.10 zeigt das am Anfang dieser Projektarbeit erwartete Ergebnis: Die Triebwerkswartungskosten der zweistrahligen A300-300 sind niedriger als die der dreistrahligen TriStar. Der vierstrahlige A340-300 hat höhere Triebwerkswartungskosten als der A300-300 und die TriStar. Die dreistrahlige MD11-ER hat die höchsten Triebwerkskosten und widerspricht dem Trend. Das liegt daran, dass die MD11-ER mehr als 200 kN mehr Schub besitzt als der A330-300.

Die Airframewartungskosten bewegen sich alle in einem ähnlichen Bereich. Nur die TriStar fällt durch ihre sehr niedrigen Airframewartungskosten auf. Hauptgrund dafür ist, dass der Flugzeugpreis fast zehn Mal kleiner ist als der Preis vergleichbarer Flugzeuge.

Die Gesamtkosten der TriStar sind aus dem genannten Grund am geringsten. Der A340-300 hat höhere Gesamtkosten als der A330-300 aber geringere als die MD11-ER.

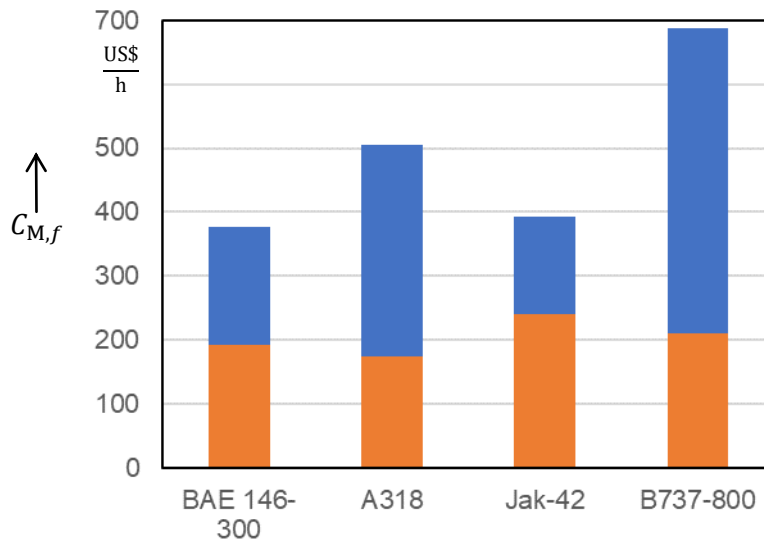


Bild 4.11 Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeuge nach der DLH-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
 - Triebwerkswartungskosten pro FH

Im Bild 4.11 ist kein klarer Trend bezüglich der Abhängigkeit zwischen Triebwerksanzahl und Triebwerkswartungskosten zu erkennen. Der zweistrahlige A318 und die B737-800 haben niedrigere Triebwerkswartungskosten als die dreistrahlige Jak-42. Die BAE 146-300 hat Triebwerkswartungskosten, die zwischen den Triebwerkswartungskosten der beiden Zweistrahler liegt.

Die BAE 146-300 und die Jak-42 haben die geringsten Airframewartungskosten. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass sie alte Flugzeuge sind und dadurch sehr kleine Flugzeugpreise haben. Die B737-800 hat die höchsten Airframewartungskosten. Die A318 hat durch den niedrigeren Flugzeugpreis als die B737-300 auch geringere Airframewartungskosten als die B737-300.

Die B737-800 hat durch die hohen Airframewartungskosten die höchsten Gesamtwartungskosten. Ihr folgt die A318. Durch die geringen Airframe- und Triebwerkswartungskosten besitzen die BAE 146-300 und die Jak-42 die geringsten Gesamtwartungskosten.

4.5.3 Auswertung der Ergebnisse der DLH-Methode

Die DLH-Methode ist bei der Berechnung der Triebwerkswartungskosten stark abhängig von dem Startschub der Triebwerke $T_{T/O,E}$. So hat die MD11-ER mehr als 40 t mehr Betriebsleermasse als der A330-300 dafür aber mehr als 200 kN mehr Schub. Des Weiteren werden bei der DLH-Methode, wie schon bei der AEA-Methode, die tiefergehenden Triebwerksdaten verwendet. Für die Auswertung haben diese Faktoren jedoch nicht so viel Einfluss, da die Triebwerke ähnlicher Bauart sind.

Bei der Berechnung der Airframewartungskosten ist eine starke Abhängigkeit von dem Flugzeugpreis und dem Flugzeugleergewicht zu erkennen. Dadurch das die Preise der Flugzeuge, wie auch die Flugzeuge selbst, aus verschiedenen Jahrzehnten stammen sind die Preise für die Flugzeuge dadurch sehr variierend und lassen dadurch keinen vergleichbaren Airframewartungskostenvergleich zu. Wie schon oben genannt fällt in der Kategorie Flugzeugpreis die TriStar als Negativbeispiel aus.

4.6 Berechnung nach der AI-Methode

4.6.1 Herleitung der Berechnung nach der AI-Methode

Die Methode der Airbus Industrie (AI-Methode) (AI 1989) ermöglicht es Wartungskosten eines Flugzeuges zu errechnen. Die Airframe- und Triebwerkswartungskosten werden dafür in Material- und Lohnkosten aufgeteilt.

Besonders bei dieser Methode ist, dass keine Preise des Flugzeuges benutzt werden und bestimmte Flugzeuge von vornherein mit Faktoren bezüglich ihres Technologiestandes der Systeme eingruppiert werden. Auch die Anzahl der Passagiere wird betrachtet. Für die Triebwerkswartungskostenberechnung werden Formeln verwendet, die denen der AEA- und DLH-Methode ähneln. Alleinstellend sind aber auch Formelbestandteile wie Startstrecken auf verschiedenen Höhen sowie Missionsabfluggewichte.

Folgende Parameter müssen bekannt sein:

- t_f Flugzeit
- m_{OE} Masse Operating Empty
- $P_{A/C}$ Preis des Flugzeugs (Airframe + Triebwerke)
- $T_{T/O, E}$ Startschub eines Triebwerks
- k_{inf} Inflationsfaktor
- n_E Triebwerksanzahl
- BPR Nebenstromverhältnis
- OAPR Gesamtdruckverhältnis (overall pressure ratio)
- n_c Anzahl Verdichterstufen (einschließlich Fan)
- n_s Anzahl der Wellen im Triebwerk
- $L_{M,h}$ Stundensatz bezogen auf eine Wartungsstunde
- $m_{T/O}$ Maximum Take Off Weight
- m_{ZF} Maximum Zero Fuel Weight
- TFR Take Off Field Length Reference : 10.000ft
- TFL Take Off Balanced Field Length (ft) at $m_{T/O}$, 2000ft altitude, ISA +20°C
- E Entfernung Gate zu Gate inkl: Rollwege und zusätzliche Manöverstrecken
- W Reichweite Flugzeug

Nachfolgend wird nach **AI 1989** hergeleitet, wie sich die Wartungskosten berechnen.

Berechnung der Airframewartungskosten pro Flugstunde $C_{M,AF,f}$:

$$C_{M,AF,f} = C_{M,AF,L,f} + C_{MM,AF,f} \quad (4.66)$$

Mit den Airframewartungskosten für Lohn pro Flugstunde $C_{M,AF,L,f}$:

$$C_{M,AF,L,f} = -4,47 + 1,1 \cdot 10^{-2} \cdot PAE + 9,34 \cdot 10^{-6} \cdot m_{OE} + 7,35 \cdot TSY \quad (4.67)$$

Und mit den Airframewartungskosten für Material pro Flugstunde $C_{MM,AF,f}$:

$$C_{MM,AF,f} = (-44,3 + 0,633 \cdot PAE + 1,36 \cdot 10^{-4} \cdot m_{OE} + 0,4 \cdot TSY \cdot PAE) \cdot k_{inf} \quad (4.68)$$

Mit den Passagieräquivalent PAE für:

Für Kurzstrecke

$$PAE = 0,829 \cdot PAX \quad (4.69)$$

Für Mittelstrecke:

$$PAE = PAX \quad (4.70)$$

Für Langstrecke:

$$PAE = 1,055 \cdot PAX \quad (4.71)$$

Technologiefaktor für Systeme TSY:

Für B727-200, B737-200, B747-200, DC9-30, DC10-30:

$$TSY = 1 \quad (4.72)$$

Für A300-B4, B747-300, MD82, MD83

$$TSY = 0,9 \quad (4.73)$$

Für A300-600, A310-200/300, B737-300, B737-400/500, B747-400, B757-200, B767-200, B767-300, MD11, MD87, MD88, BAE146, Fokker 100

$$TSY = 0,8 \quad (4.74)$$

Für A320, A330, A340, B737, MD91, MD92, AS100

$$TSY = 0,7 \quad (4.75)$$

Berechnung der Triebwerkswartungskosten pro Flugstunde $C_{M,E,f}$:

$$C_{M,E,f} = \frac{C_{M,E,fl}}{t_f} \quad (4.76)$$

Berechnung der Triebwerkswartungskosten pro Flug $C_{M,E,fl}$:

$$C_{M,E,fl} = n_E \cdot (C_{MM,E,f} + C_{M,E,L,f}) \cdot (0,9 \cdot t_f + 0,4) \cdot SEF \quad (4.77)$$

Mit den Lohnkosten für die Triebwerkswartung pro Flugstunde $C_{M,E,L,f}$:

$$C_{M,E,L,f} = 0,75 \cdot k_7 \cdot \left(1 + T_T \cdot \frac{0,4536}{1000}\right)^{0,7} \cdot L_{M,h} \cdot k_{inf} \cdot 1,52 \quad (4.78)$$

Mit den Faktoren zur Triebwerksbeschreibung:

$$k_6 = 0,026 \cdot n_c + k_9 \quad (4.79)$$

$$k_9 = \begin{cases} 0,6 \text{ für } n_s = 1 \\ 0,68 \text{ für } n_s = 2 \\ 0,76 \text{ für } n_s = 3 \end{cases} \quad (4.80)$$

$$k_7 = k_1 \cdot k_6 \quad (4.81)$$

k_1 bei DLH – Methode und AEA

$$k_8 = k_1 \cdot (k_6 + k_2) \quad (4.82)$$

k_2 bei DLH – Methode und AEA

Mit der Berechnung der Flexible Take Off Ratio SEV:

$$SEV = 50 \cdot \frac{(m_{T/O} - m_{T/O,miss})}{m_{T/O}} \cdot \frac{TFR}{TFL} \quad (4.83)$$

Mit der Berechnung des Missionsabfluggewichts $m_{T/O,miss}$ mit der Näherungsformel:

$$m_{T/O,miss} = m_{ZF} + \frac{m_{T/O}}{m_{ZF}} \cdot \frac{E}{W} \quad (4.84)$$

Berechnung des Derating Factors SEF :

$$SEF = 1 - 0,336 \cdot (1 - e^{[-0,08 \cdot SEF]}) \cdot (1 - 0,165 [t_f - 1]^{0,63}) \quad (4.85)$$

Berechnung der Triebwerkswartungskosten für das Material pro Flugstunde $C_{MM,E,f}$:

$$C_{MM,E,f} = 5 \cdot \left(3,63 + 0,91 \cdot T_{T/O,E} \cdot \frac{0,4536}{1000} \right) \cdot k_8 + 5,07 \cdot k_{inf} \cdot 2,155 \quad (4.86)$$

4.6.2 Ergebnisse der AI-Methode

Die Ergebnisse der DLH-Methode für die gesamten Wartungskosten pro Flugstunde sind im Bild 4.12 und 4.13 dargestellt.

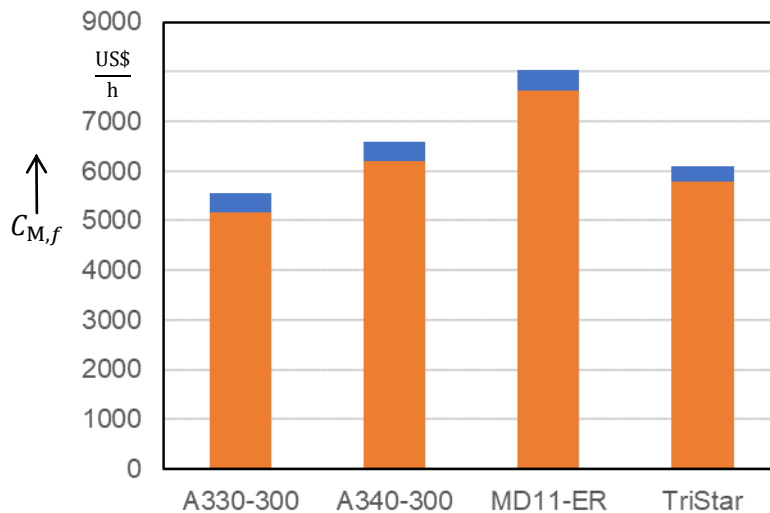


Bild 4.12 Wartungskosten von Langstreckenflugzeuge nach der AI-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
■ Airframewartungskosten pro FH
■ Triebwerkswartungskosten pro FH

Die Ergebnisse der Langstreckenflugzeuge der AI-Methode, die in Bild 4.12 dargestellt sind weisen, mit Ausnahme der MD11-ER, den Trend auf, der zu Beginn der Projektarbeit als These aufgestellt wurde. Die Triebwerkswartungskosten sind abhängig von der Anzahl der Triebwerke. Auffällig ist die Höhe der Triebwerkswartungskosten. Grund dafür sind die Höhe der Lohn- und Materialwartungskosten der Triebwerke, die einzeln bereits höher sind als die gesamten Triebwerkswartungskosten der anderen Methoden. Die hohen Ergebnisse resultieren aus den Formeln 4.78 und 4.86. Die MD11-ER besitzt im Vergleich zu anderen Methoden einen sehr hohen Wert von 7500 US\$, das sind etwa zehn Mal mehr als der Wert bei der AEA-Methode. Grund dafür ist, dass die MD11-ER ein schubstarkes Flugzeug ist. Das könnte daran liegen, dass die Aerodynamik der älteren Flugzeuge schlechter ist und so mehr Schub zum Fliegen benötigt.

Die Airframewartungskosten liegen bei dieser Methode zwischen 315 US\$ bis 420 US\$. Das entspricht etwa der Hälfte der Airframewartungskosten der vorausgegangenen Methoden (ATA67-Methode ausgeschlossen). Die Airframewartungskosten untereinander verglichen sind in einer Größenordnung. Das ist damit zu begründen, dass die Methode rechnet, als hätten die Flugzeuge in etwa den gleichen Rumpf.

Die Gesamtwartungskosten sind stark von den Triebwerkswartungskosten geprägt und bilden daher das gleiche Ergebnis ab.

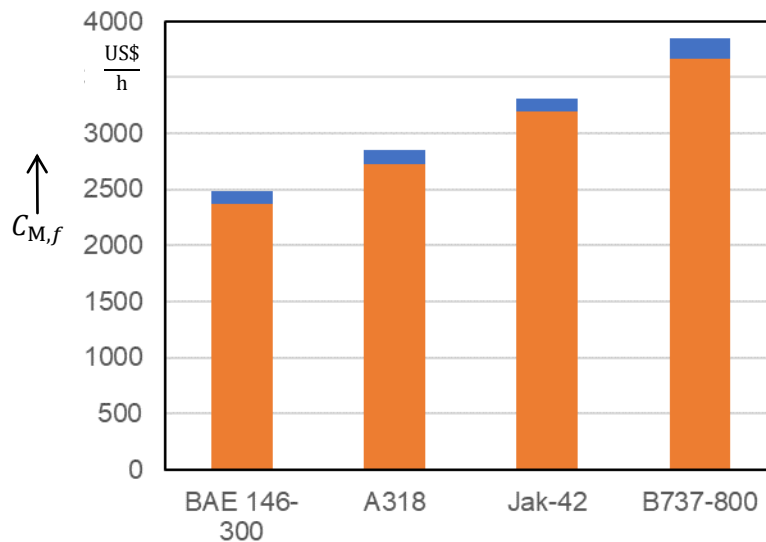


Bild 4.13 Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeuge nach der AI-Methode

- $C_{M,f}$ Wartungskosten pro FH
- Airframewartungskosten pro FH
 - Triebwerkswartungskosten pro FH

Die Ergebnisse in Bild 4.13 weisen mit Ausnahme vom A318 einen gegenteiligen Trend auf. Das ist andersherum als im Anfang der Projektarbeit angenommen. Die Zweistrahlige B737-800 hat die höchsten Triebwerkswartungskosten, gefolgt von der dreistrahligen Jak-42 und der vierstrahligen BAE 146-300. Der A318 liegt zwischen der BAE 146-300 und der Jak-42. Es fällt wieder auf, dass auch bei der Mittelstrecke die Triebwerkswartungskosten etwa zehn Mal höher sind als bei den vorherigen Methoden, ausgenommen ATA67 Methode.

Die Airframewartungskosten liegen zwischen 100 US\$ und 175 US\$. Das ist etwa fünf mal weniger als bei den vorangegangenen Methoden. Die höchsten Airframewartungskosten hat B737-800. Da die Methode keine Flugzeugpreise betrachtet sind die hohen Airframewartungskosten mit dem Fassungsvermögen von etwa 40 Passagieren mehr als bei den vergleichbaren Flugzeugen zu begründen.

Die Gesamtkosten orientieren sich an den Triebwerkswartungskosten. Die Airframewartungskosten können das Ergebnis nicht verändern.

4.6.3 Auswertung der Ergebnisse der AI-Methode

Die AI-Methode ist unter den betrachteten Methoden die einzige Methode, die für die Berechnung der Wartungskosten keine Flugzeug- oder Triebwerkspreise braucht. Dadurch entfällt das Risiko, durch die stark abweichenden Preise, auch aus verschiedenen Jahren (auf das Basisjahr 2017 gerechnet), dass die Ergebnisse dieser Methode in der Hinsicht fehlerhaft sind. Stattdessen ist der Methode ein Datenblatt beigelegt, welches in dieser Berechnung aus dem 1994 stammt. Dadurch wird die Methode auf die aktuellen wirtschaftlichen Parameter eingestellt.

Stattdessen wird erstmal bei den Airframewartungskosten mit den Passagierzahlen pro Flugzeug gerechnet. Außerdem gibt es einen Faktor, der den Technologiestand miteinbezieht. Außerdem wird, wie auch bei anderen Methoden die Betriebsleermasse berücksichtigt.

Für die Triebwerkswartungskosten werden die Triebwerkskennzahlen, Lohnkosten, Flugzeit und der Take Off Schub betrachtet. Neu bei dieser Methode sind aber auch die Betrachtung der Startstrecke auf verschiedenen Höhen, die Reichweite des Flugzeugs und die durchschnittliche Missionsstartmasse betrachtet.

5 Auswertung der DOC-Methoden

5.1 Vergleich der DOC-Methoden

Zum Vergleich der Methoden untereinander und mit den Flugzeugen gleicher Kategorie werden die Triebwerkswartungskosten pro Flugstunde, wie im Bild 5.1 für Langstreckenflugzeuge und Bild 5.2 für Mittelstreckenflugzeuge zu sehen ist, betrachtet. Bewusst werden nur die Triebwerkswartungskosten und nicht die Airframewartungskosten betrachtet, da die, wahrscheinlich nicht korrekten, Flugzeugpreise die Ergebnisse der Airframewartungskosten mehr verfälschen als die Triebwerkswartungskosten, welche mit Daten errechnet werden, die seriöser und gleichbleibender sind als Preise.

5.1.1 Betrachtung der Triebwerkswartungskosten

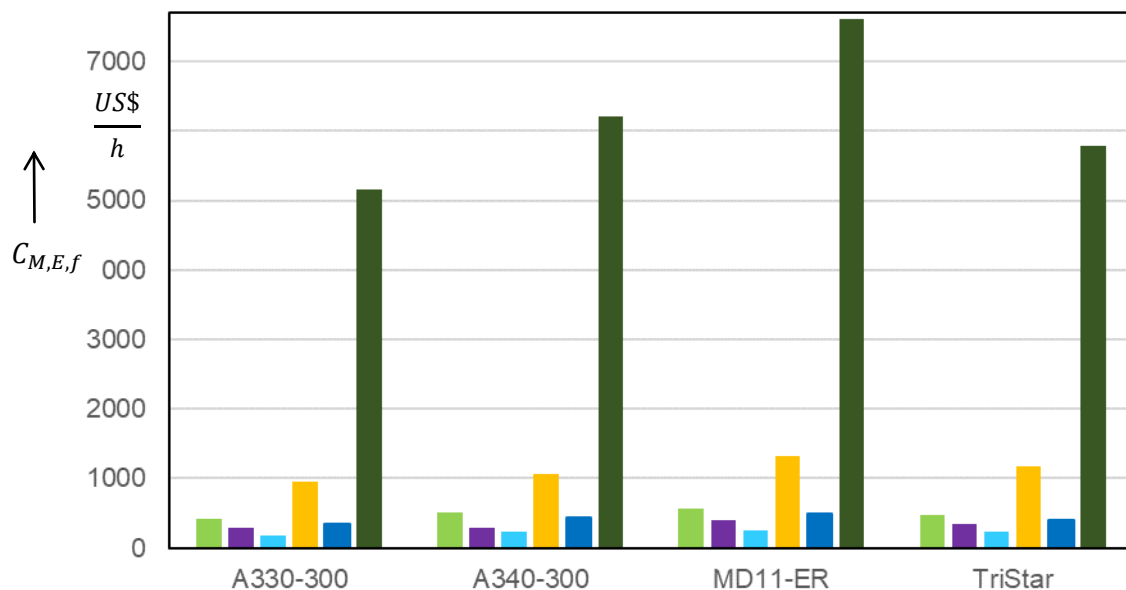


Bild 5.1 Triebwerkswartungskosten von Langstreckenflugzeugen

- $C_{M,E,f}$ Triebwerkswartungskosten pro FH
- AEA-Methode
 - Methode nach Jenkinson
 - TUB-Methode
 - ATA67-Methode
 - DLH-Methode
 - AI-Methode

Im Bild 5.1 ist zu erkennen, dass die TUB-Methode die geringsten Triebwerkswartungskosten errechnet während die AEA-Methode rund die doppelten Wartungskosten als Ergebnis herausbekommt. Die DLH Methode ist von den Triebwerkswartungskosten ähnlich der AEA-Methode, wobei sie immer etwas unterhalb dieser liegt. Die Methode nach Jenkinson zwischen der AEA- und TUB-Methode. Die ATA67-Methode hat in etwa die dreifachen Triebwerkswartungskosten wie die TUB-Methode. Die AI-Methode errechnet mehr als zehn Mal höhere Triebwerkswartungskosten als die AEA-Methode und etwa fünf Mal höhere als die ATA67 Methode.

Unter diesen Gesichtspunkten kann behauptet werden, dass die AEA-, TUB-, Jenkinson- und DLH-Methode in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Die ATA67- und AI-Methode fallen durch ihre stark abweichenden Ergebnisse auf. Wobei man nicht sagen kann, welche Methode die richtigste ist, da vergleichbare Daten der Fluggesellschaft fehlen.

Bei allen Methoden erzielt der zweistrahlige A330-300 niedrigere Triebwerkswartungskosten als der vierstrahlige A340-300, außer bei der Methode nach Jenkinson. Durch die zeitnahen Erstflüge, den gleichen Hersteller und den ähnlichen Abmaßen ist dieser Fakt sehr repräsentativ. Die Flugzeuge sind aus technischer Sicht fast identisch und unterscheiden sich fast nur durch die Triebwerksanzahl. Dies ist in Bild 5.2 gut zu erkennen.

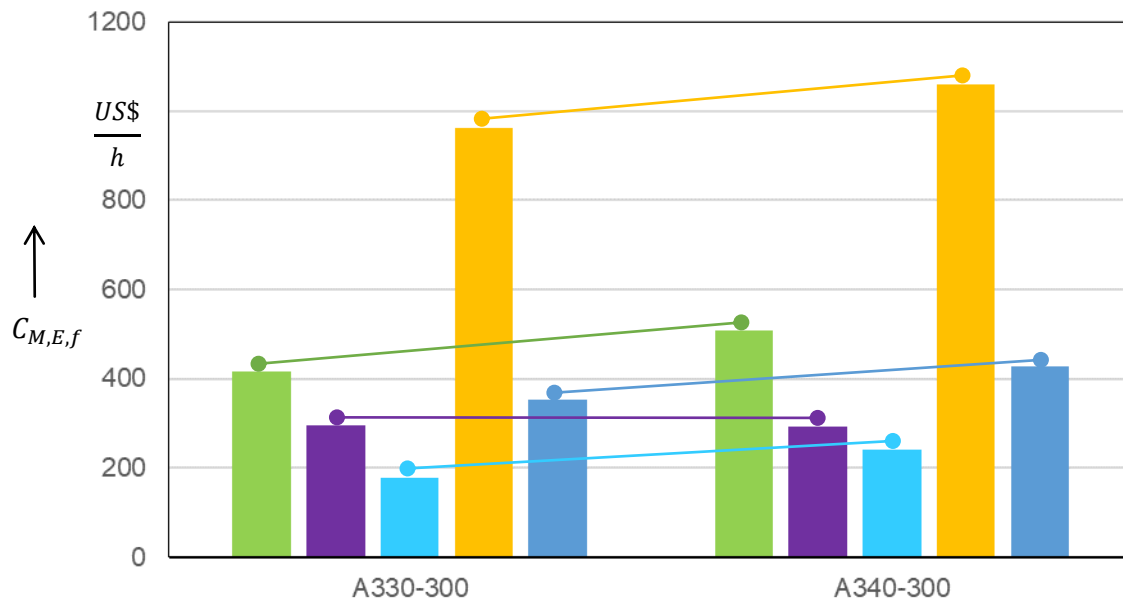


Bild 5.2 Triebwerkswartungskosten von A330-300 und A340-300

- $C_{M,E,f}$ Triebwerkswartungskosten pro FH
- AEA-Methode
 - Methode nach Jenkinson
 - TUB-Methode
 - ATA67-Methode
 - DLH-Methode

Bei folgenden Methoden ist mit Ausschluss eines Flugzeugs ein Trend bezüglich der Abhängigkeit zwischen Triebwerkswartungskosten und Triebwerksanzahl zu erkennen:

Bei der AEA-, TUB-, DLH- und AI-Methode ist ein Trend zwischen A330-300, TriStar und A340-300 zu erkennen. Die Schubstarke MD11-ER verfälscht durch die hohe Leistung das Ergebnis und hat bei allen Methoden die höchsten Triebwerkswartungskosten. Die Jenkinson-Methode fällt raus, da sie sich nur an dem gesamten Triebwerksschub orientiert. Durch den etwas schubstärkeren A330-300 im Vergleich zum A340-300 sind dort die Triebwerkswartungskosten dementsprechend höher.

Bei den sechs Methoden erzielt der A330 die geringsten Kosten und die MD11 die höchsten. Dies führt zu dem Schluss, dass die drei Methode bei den Triebwerkskosten vergleichbar sind.

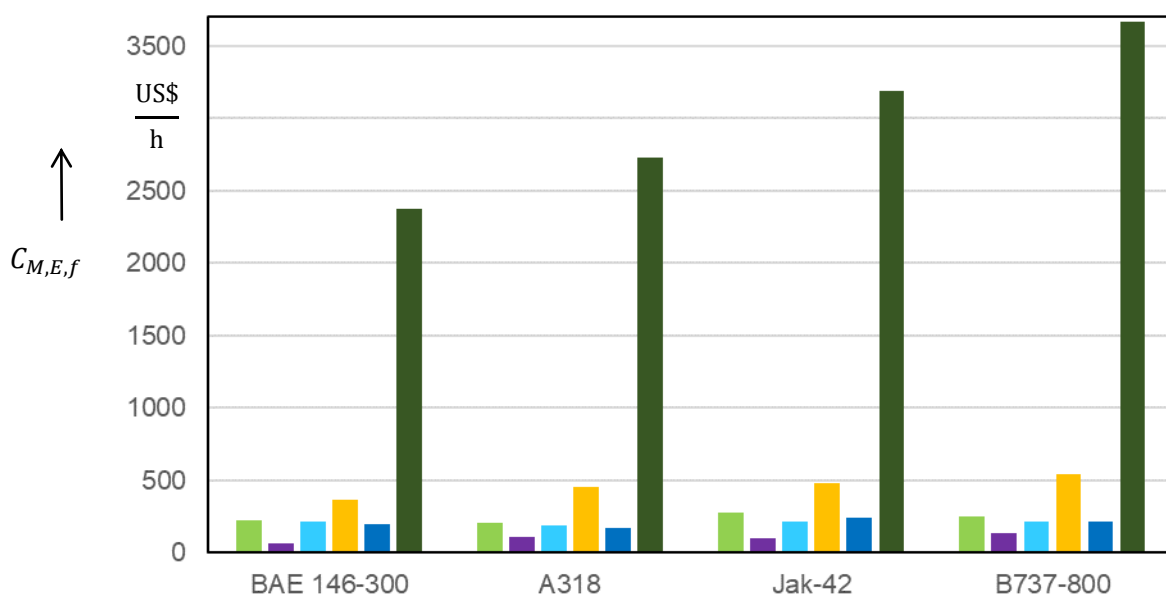


Bild 5.3 Triebwerkswartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen

- $C_{M,E,f}$ Triebwerkswartungskosten pro FH
- AEA-Methode
 - Methode nach Jenkinson
 - TUB-Methode
 - ATA67-Methode
 - DLH-Methode
 - AI-Methode

Das Bild 5.2 zeigt, dass die Wartungskosten der Triebwerke für Mittelstreckenflugzeuge, bei der gewählten Flugdauer, relativ genau der Hälfte der Triebwerkswartungskosten der Langstreckenflugzeuge pro Flugstunde ergibt. Eine Ausnahme bilden dabei die TUB-Methode, bei der die Triebwerkswartungskosten pro Flugstunde in etwa den der Langstrecke entsprechen und die Methode nach Jenkinson, bei der die Triebwerkswartungskosten der

Mittelstrecke nur etwa ein Drittel der Langstrecke betragen. Begründet werden kann die TUB-Methode damit, dass die Triebwerkswartungskosten eigentlich pro Flug ausgerechnet werden. Durch das dividieren der Triebwerkswartungskosten pro Flug durch die bei der Langstrecke große Flugzeit und bei der Mittelstrecke kurze Flugzeit, werden die einst voneinander abweichenden (etwa Faktor drei) Triebwerkswartungskosten, auf die gleiche Größenordnung reduziert. Pro Flugstunde schwanken die Triebwerkswartungskosten bei Kurz- und Langstrecke nur etwa zwischen 180 US\$ und 250 US\$. Bei den jährlichen Kosten wird eine Abweichung von ca. Faktor zwei sichtbar.

Ein Trend bezüglich der Abhängigkeit von Triebwerkswartungskosten von der Triebwerksanzahl ist bei allen sechs Methoden nicht vorhanden. Ein möglicher Grund können die stark voneinander abweichenden Erstflüge, Triebwerksmassen, Gesamtdruckverhältnisse und Triebwerksschub sein.

Jedoch bei Vernachlässigung eines der vier Flugzeuge ist ein Trend zu sehen. Bei der AEA-, Jenkinson- und AI-Methode ist zu erkennen, dass die Triebwerkskosten mit steigender Triebwerksanzahl sinken. Bei der AEA- und AI-Methode muss der A318 vernachlässigt werden und bei der Methode nach Jenkinson die B737-800. Der Trend ist genau andersherum wie am Anfang der Projektarbeit erwartet.

Auffallend ist jedoch, dass die AEA-, TUB- und DLH-Methoden Flugzeugübergreifen in einer Größenordnung liegen. Die TUB-Methode hat nur etwa die Hälfte der Triebwerkswartungskosten der zuvor genannten Methoden. Die ATA67 Methode liefert Triebwerkswartungskosten, die etwa viermal so hoch wie die der TUB-Methode sind. Noch auffälliger als die ATA67-Methode ist die AI-Methode, die etwa zehn Mal höher als die AEA-, TUB-, DLH-Methode und etwa fünfmal höher als die ATA67-Methode ist.

Anhand der Methode nach Jenkinson ist zu erkennen, dass Mittelstreckenflugzeuge mit mehr Triebwerken geringere Triebwerkswartungskosten haben. Bei den anderen Methoden ist keine Abhängigkeit zu erkennen.

Die Methode nach Jenkinson verhält sich anders als die TUB- und die AEA-Methode. Während bei Jenkinson die Zweistraher höhere Wartungskosten erzielen ist es bei der TUB- und AEA-Methode die dreistrahlige Yak-42 mit den höchsten Wartungskosten. Der Vierstrahliger BAE146 besitzt die zweitgeringsten Wartungskosten. Dies führt zu dem Schluss, dass die TUB- und AEA-Methode vergleichbar sind.

5.1.2 Betrachtung der anteiligen Wartungskosten für die Langstrecke

Eine weitere Variante die Methoden zu vergleichen ist das Verhältnis zwischen Triebwerkswartungskosten sowie Airframewartungskosten zu betrachten. Differenziert wird dabei zwischen Lang- und Mittelstrecke.

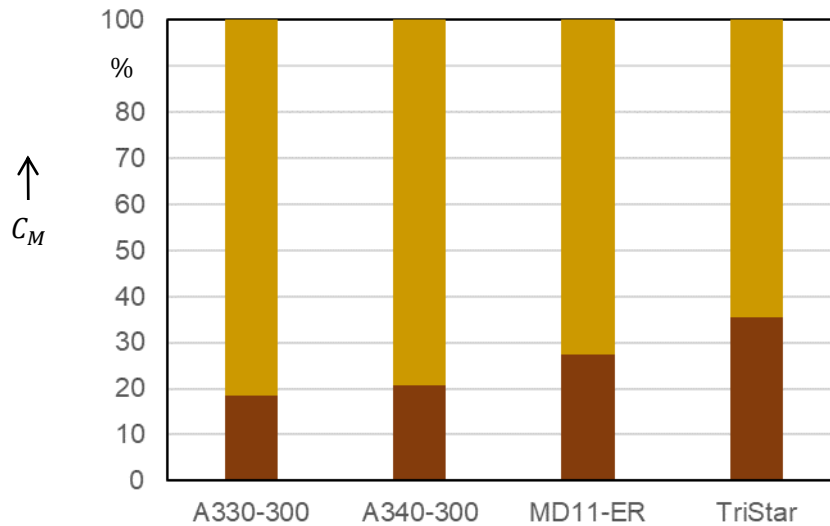


Bild 5.4 Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der AEA-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkswartungskosten

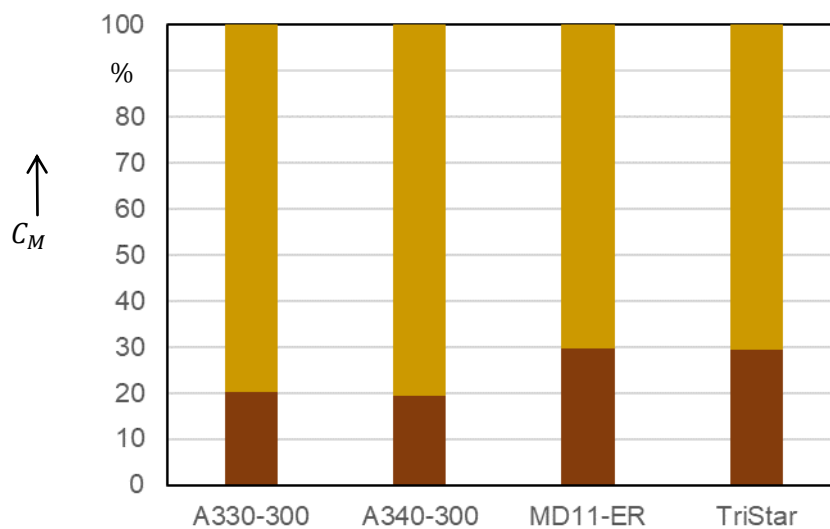


Bild 5.5 Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach Jenkison

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkswartungskosten

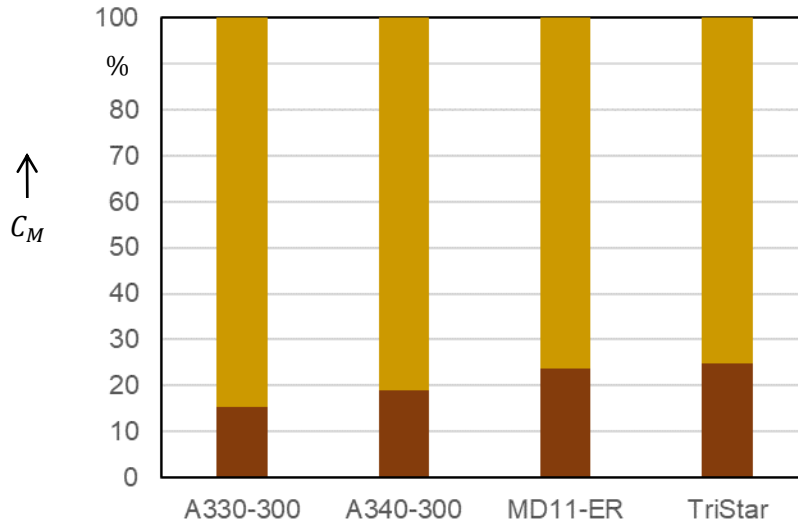


Bild 5.6 Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der TUB-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
 ■ Anteil Airframewartungskosten
 ■ Anteil Triebwerkwartungskosten

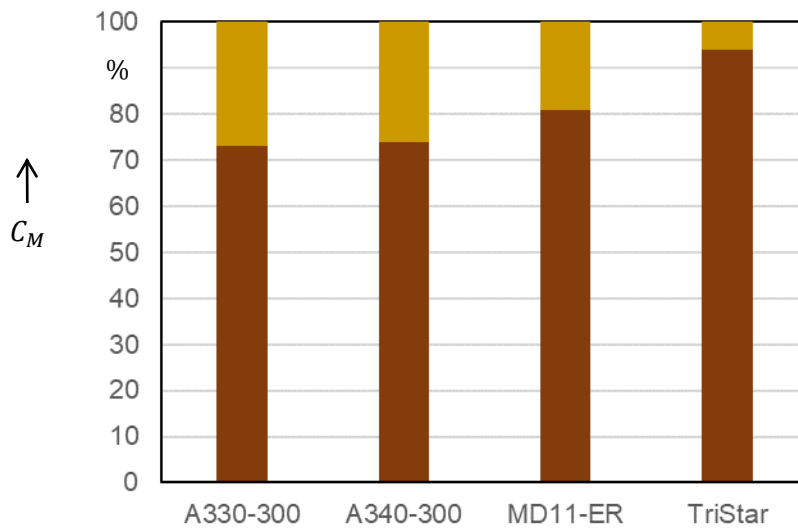


Bild 5.7 Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der ATA67-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
 ■ Anteil Airframewartungskosten
 ■ Anteil Triebwerkwartungskosten

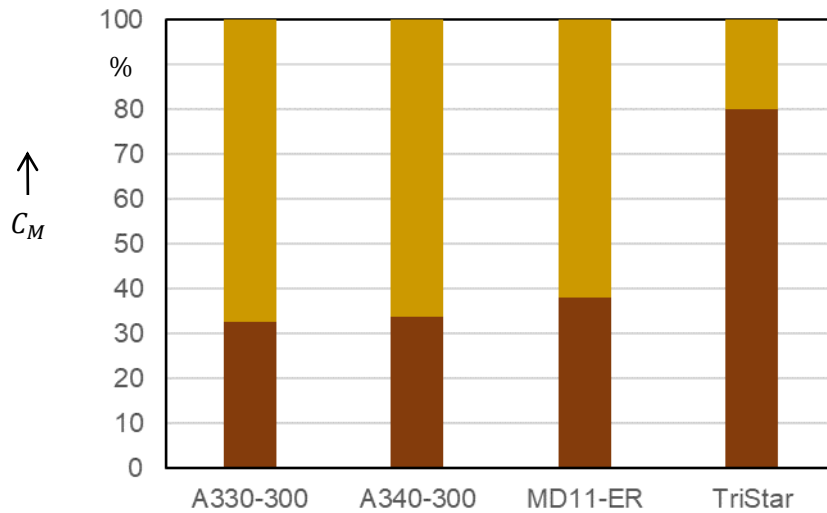


Bild 5.8 Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der DLH-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkwartungskosten

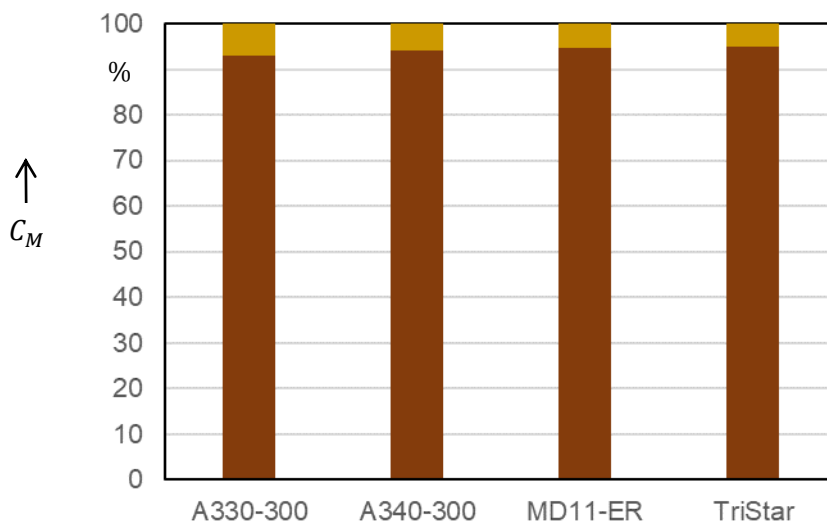


Bild 5.9 Anteilige Wartungskosten von Langstreckenflugzeugen nach der AI-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkwartungskosten

In den Diagrammen 5.3, 5.4 und 5.5 der Langstreckenflugzeuge ist deutlich zu erkennen, dass die Airframewartungskosten überwiegen. Bei der AI-Methode sowie der ATA67-Methode ist es umgekehrt. Bei der DLH-Methode überwiegen die Triebwerkswartungskosten bei der TriStar. Bei den restlichen Flugzeugen sind diese deutlich geringer.

Dabei sind die Triebwerkskosten bei der TUB-Methode am geringsten mit rund 20 %. Bei der AEA und der TUB-Methode sind diese im Schnitt bei rund 25 % sind. Bei der ATA67-Methode liegen die Werte zwischen 75 % und 95 %. Bei der AI-Methode liegen sie bei rund 95 %. Große Schwankungen gibt es bei der DLH-Methode. Bei der TriStar liegen die Werte bei mehr als doppelt so hoch mit über 80 %.

Den niedrigsten Wert erreicht der A330-300 mit rund 15 % nach der TUB-Methode. Den höchsten Wert erzielt die TriStar mit rund 95 %.

Eine Abhängigkeit zu der Anzahl der Triebwerke ist bei keiner der Methoden zu erkennen. Im Allgemeinen haben die moderneren Airbusflugzeuge einen geringeren Anteil an Triebwerkskosten als die ältere MD11-ER und die TriStar.

5.1.3 Betrachtung der anteiligen Wartungskosten für die Mittelstrecke

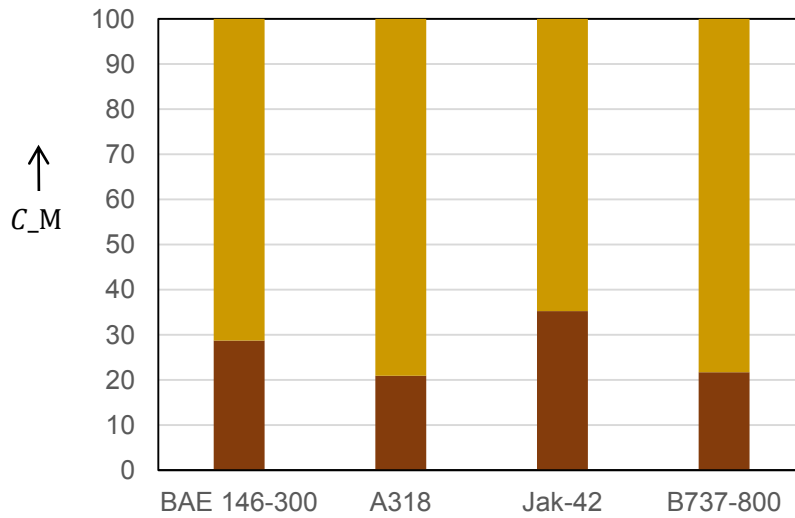


Bild 5.10 Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach der AEA-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkwartungskosten

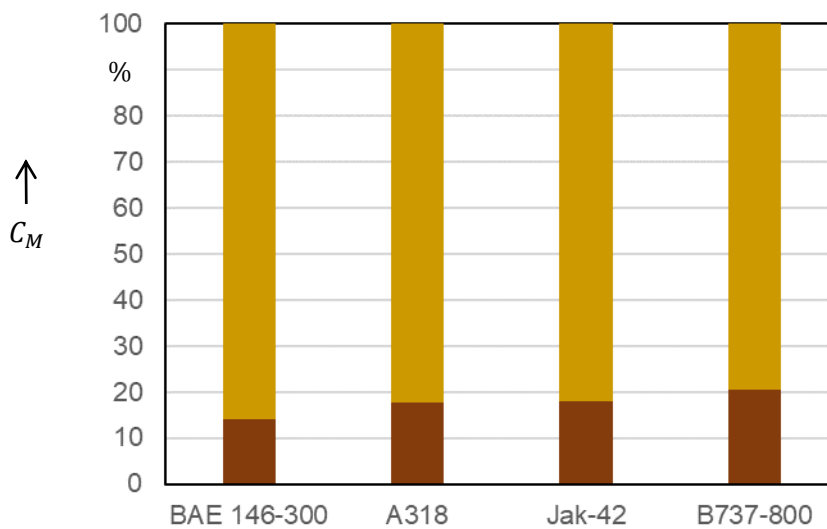


Bild 5.11 Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach Jenkinson

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkwartungskosten

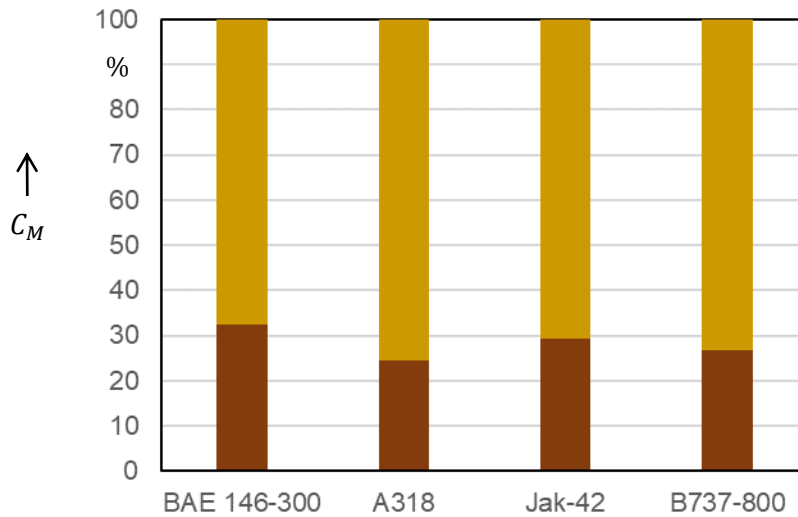


Bild 5.12 Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach der TUB-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkwartungskosten

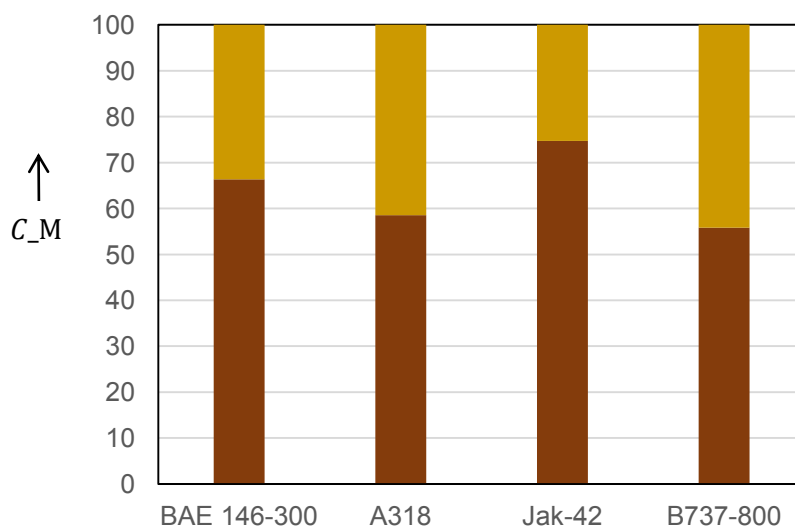


Bild 5.13 Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach der ATA67-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkwartungskosten

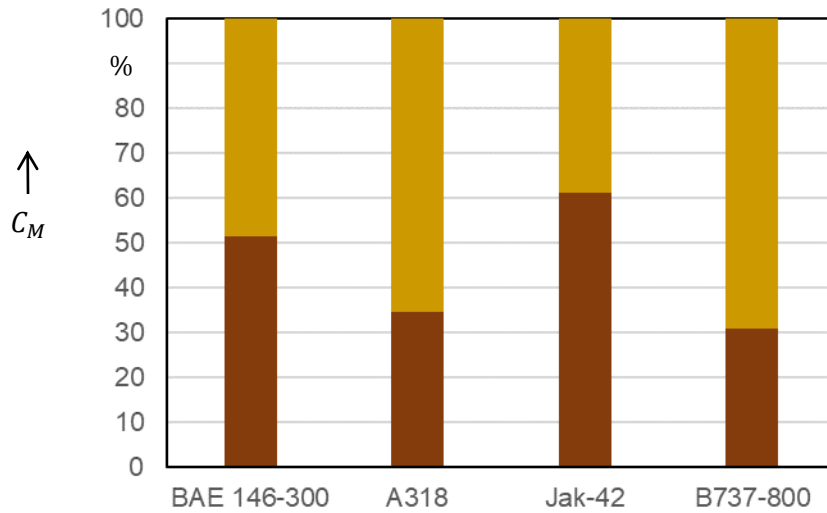


Bild 5.14 Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach der DLH-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkwartungskosten

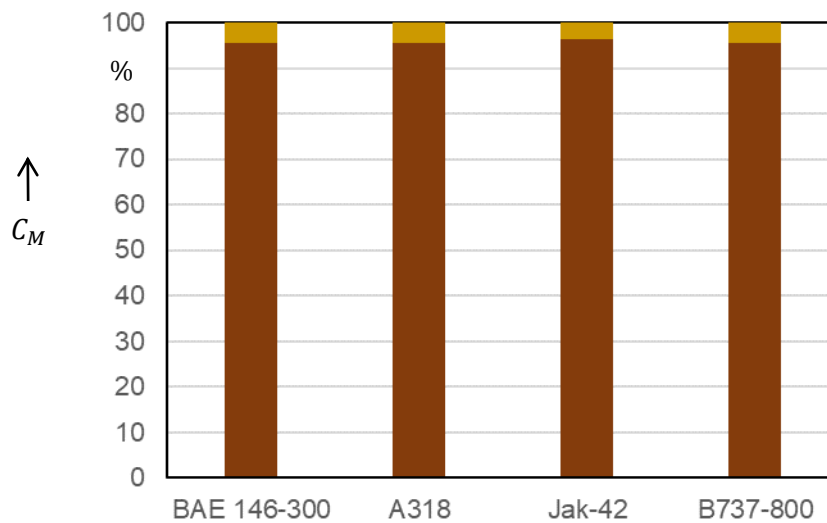


Bild 5.15 Anteilige Wartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen nach der AI-Methode

C_M gesamte Wartungskosten
■ Anteil Airframewartungskosten
■ Anteil Triebwerkwartungskosten

In den Diagrammen 5.6, 5.7 und 5.12 der Mittelstreckenflugzeuge ist das Verhalten ähnlich wie bei den Langstreckenflugzeugen. Die Airframewartungskosten machen den größeren Teil der Gesamtwartungskosten aus. In den Diagrammen 5.12 und 5.14 sind die Triebwerkskosten dominieren. Bei der DLH-Methode ist das Ergebnis durchmisch. Hier haben die Zweistrahler den deutlich geringeren Anteil an den Triebwerkswartungskosten. Die dreistrahlige Yak-42 besitzt die höchsten Triebwerkswartungskosten. Dabei sind die Triebwerkskosten bei der Methode nach Jenkinson am geringsten mit rund 15-20 %. Die Yak-42 hat mit über 96 % den höchsten Anteil der Triebwerkswartungskosten bei der AI-Methode.

Bei der AEA sind große Unterschiede zwischen den Triebwerkswartungskosten erkennbar. Die Ergebnisse der AEA-, TUB- und der Methode nach Jenkinson liegen im Schnitt bei 25 %. Die anderen Methoden haben höhere Wartungskosten. Besonders bei der DLH-Methode gibt es große Abweichungen.

Im Vergleich der Langstreckflugzeugen mit den Mittelstreckenflugzeugen ist erneut keine klare Tendenz zu erkennen. Während im Schnitt bei der AEA-Methode, der ATA67-Methode und bei der Methode nach Jenkinson die Langstreckenflugzeuge den höheren Anteil an Triebwerkswartungskosten aufweise kommt die TUB-Methode zu dem Ergebnis, dass die Mittelstreckenflugzeuge einen höheren Triebwerkswartungskostenanteil besitzen. Bei der AI-Methode bleiben die Anteile gleich. Der der DLH-Methode ist es vom Flugzeugtyp abhängig.

5.2 Kritische Methodenbetrachtung

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass die Methoden auf ähnlichen Ansätzen basieren wie die Wartungskosten abhängig vom Schub zu berechnen. Dabei ergeben sich jedoch sehr unterschiedlich Werte.

Die verwendeten Methoden sind nur zum Teil anwendbar und vergleichbar.

Problematisch ist die schnelle Entwicklung des Kaufpreises gegenüber der Inflation. Dadurch, dass die Preise älterer Flugzeuge zum Teil nur ein Zehntel und weniger von modernen Flugzeugen, aufgrund von einfacherer verwendeter Technik, betragen sind die Formeln nicht auf alle Flugzeuge gleichermaßen sinnvoll anzuwenden. Der Preis der Triebwerke ist zum Großteil unbekannt und wurde deshalb einheitlich mit der Methode nach Jenkinson bei der AEA-Methode ausgerechnet. Da der Triebwerkspreis vom Schub abhängt (siehe Formel 4.15) wird der Airframepreis anhand der Differenz von Gesamtpreis minus gesamter Triebwerkspreis ermittelt. Dies führt bei der DC8-73 dazu, dass der Triebwerkspreis größer als der gesamte Kaufpreis ist weshalb das Flugzeug für diese Auswertung nicht zur Verfügung stand. Der Inflationsfaktor passt den Kaufpreis zwar auf das Jahr 2017 an, jedoch steigt dieser dabei nicht ausreichend um den geringen Listenpreis auf ein Maß zu heben, dass sich positive Wartungskosten ergeben (Bild 5.15). Bei der TirStar ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Triebwerkspreise sind so groß, dass diese deutlich größer sind als der Flugzeugzellenpreis.

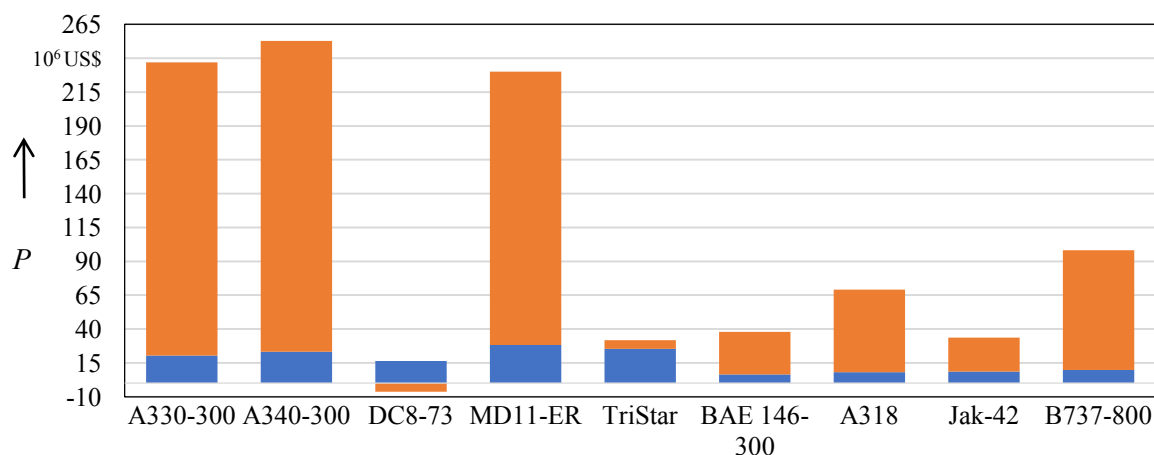


Bild 5.16 Flugzeugpreis verschiedener ziviler Verkehrsflugzeug

- P Flugzeugpreis
- Triebwerkspreis
- Flugzeugzellenpreis

Da sich ausschließlich an der deutschen Inflation orientiert wurde und dies auch auf den amerikanischen US\$ und den britischen Pfund angewandt wurde, kann dies zusätzlich zu Abweichungen zwischen tatsächlichen und ermittelten Wert führen.

Weiterhin sind die Flugzeuge nur bedingt vergleichbar. Sie besitzen zwar ähnliche Dimension, siehe Tabelle 3.1 und 3.2, variieren jedoch erheblich bei Leermassen, Schub sowie Eigenschaften des Triebwerkes wie das OAPR. Dies erschwert die Auswertung der Daten. Am besten eignen sich A340 und A330 da sie am ähnlichsten sind.

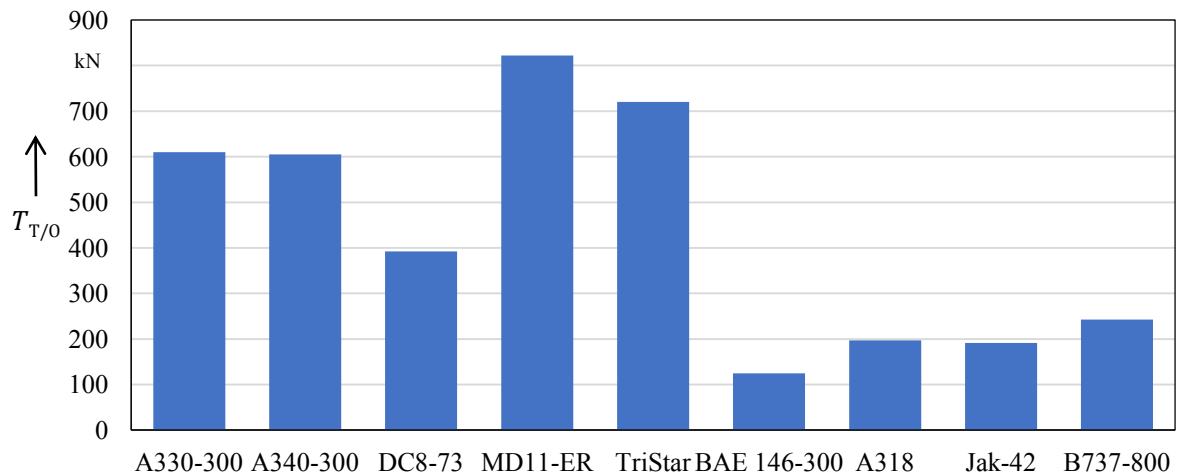


Bild 5.17 Gesamter Schub der Flugzeuge

Da die Methodenergebnisse zum Teil vom Schub abhängen erzielt die schubstarke MD11-ER übermäßig hohe Kosten siehe Bild 5.16. Das Hecktriebwerk, welches deutlich aufwändiger zu warten ist, wird genauso behandelt in der Berechnung wie die Triebwerke unter den Flügeln.

Ein weiteres Problem sind die Werte der Flugzeuge welcher sich nicht mehr in Produktion befinden. Bei der MD11-ER wird kein Kaufpreis mehr angegeben. Dadurch musste dieser geschätzt werden.

Die Länge der benötigten Startbahn bei der AI-Methode mussten mehrmals geschätzt werden. Keine Daten waren für die TriStar und die die BAE 146 verfügbar. Für die Airbusflugzeuge wurde die benötigte Startlänge nur bis zu einer Referenzhöhe von 8000 ft, in 2000 ft Schritten, angegeben weshalb die Werte von 10000 ft anhand der schrittweisen Veränderungen der Startbahnlänge ermittelt wurde. Die DC8-73 schafft es nur mit weiter ausgefahrenen Klappen auf 10000 ft mit maximalen Abfluggewicht zu starten weshalb die Startlänge sogar geringer ist als auf 2000 ft.

Während sich die die Werte in den meisten Methoden problemlos in Flugzeit umrechnen lassen bezieht sich die TUB-Methode auf die Blockzeit. Die Umrechnung führt dabei zu Verfälschung des Ergebnisses da sich in Formel 4.32 zur Berechnung des Triebwerkswartungspreises Anteile wie Schub befinden welche sich auf keine Zeit beziehen.

Diese dann mit einem Faktor zu verrechnen, der sich aus dem Verhältnis von Blockzeit zu Flugzeit ergibt, ist mathematisch nicht korrekt. Dafür wäre ein neuer Ansatz notwendig.

Die Methoden betrachten unterschiedliche Faktoren in Ihrer Berechnung. Vorteilhaft der TUB-Methode ist, dass keine Kenntnisse über den Aufbau des Triebwerkes oder über die Preise des Flugzeuges notwendig sind. Dadurch sind die eingegebenen Werte nicht durch die Inflation beeinträchtigt. Es werden keine Personalkosten betrachtet.

Die Methode nach Jenkinson ist ebenso unabhängig von dem Aufbau des Triebwerkes und der Kaufpreise. Da sich die Berechnung komplett auf die Flugzeit bezieht, ist es möglich anschließend die Kosten pro FH zu berechnen. Die Flugzeuge mit mehr Triebwerken bei den Mittelstreckenflugzeugen haben, ausgenommen von dem A318, geringere Wartungskosten.

Die AEA-Methode ist die umfangreichste und damit auch aufwendigste Methode. Für sie sind umfangreiche Kenntnisse zum Aufbau des Triebwerkes sowie zu dem Flugzeug notwendig. Durch Einbeziehung der Personalkosten in Abhängigkeit der Komplexität des Triebwerkes ist diese Methode realitätsnah. Jedoch werden die Ergebnisse durch angenommene und zeitlich stark abweichende Kaufpreise beeinflusst.

Die ATA67-Methode betrachtet die Entfernung die bei einem Zyklus zurückgelegt wird und gibt die Wartungskosten pro nautische Meile an was auf die Kosten pro Flugstunde umgerechnet werden muss. Die Methode gibt als Lohnkosten 4 US\$ pro Stunde an was deutlich unter den Werten der anderen Methoden liegt wo unter anderem mit 82,75 US\$ pro Stunde gerechnet wird. Trotzdem sind die Wartungskosten nach der AI-Methode am höchsten, siehe Bild 5.1 und 5.2. Sie wären noch höher als die AI-Methode, wenn die Lohnpreise angepasst würden. Die Methode betrachtet nicht den Aufbau des Triebwerkes, sondern allgemeinere Daten wie Masse, Schub und Anzahl der Triebwerke. Bei Formel 4.41 werden konstante Faktoren benötigt die davon abhängen, ob es ein Turbojet oder ein Turboprop Triebwerke besitzt. Hier wurden die Werte für Turbojet gewählt obwohl es sich eigentlich um einen Turbofan handelt.

Die DLH-Methode ähnelt zum Teil der AEA-Methode. Es werden zum Teil die gleichen Angaben für die Triebwerke benötigt. Neu ist die Verwendung der Sektorflugzeit. Dabei wurden möglichst realistische Annahmen getroffen um die Flugzeit umzurechnen. Da das Material der Flugzeuge anders ist als bei den neuesten Generationen wie dem A350 wurde der Material Altersfaktor alt gewählt. Ebenso wurde davon ausgegangen, dass die Mechaniker erfahren sind weshalb der Arbeiterfahrfaktor alt gewählt wurde. Diese Annahmen können auch anders festgelegt werden wodurch im Methodenvergleich andere Verhältnisse zwischen den Methodenergebnissen entstehen können. Der Arbeitslohn fließt, nicht wie bei den anderen Methoden, nicht mit in die Rechnung mit ein.

Die AI-Methode weist die mit Abstand höchsten Wartungskosten auf. Das liegt daran, dass bei den Lohnkosten für die Triebwerkswartung (Formel 4.78) der Triebwerksschub mit den Lohnkosten und anderen Faktoren multipliziert wird. Dabei wird der Schub zwar um mehr als den Faktor tausend verringert, da der Schub aber einen sechsstelligen Wert besitzt und anschließend mit den Lohnkosten von 82,75 US\$ pro Stunde und weiteren Faktoren multipliziert wird, ergeben sich sehr hohe Wartungskosten.

$$C_{M,E,L,f} = 0,75 \cdot k_7 \cdot \left(1 + T_{T/O,E} \cdot \frac{0,4536}{1000}\right)^{0,7} \cdot L_{M,h} \cdot k_{inf} \cdot 1,52 \quad (4.78)$$

Am Beispiel des A330-300 sind folgende Werte einzusetzen:

$$k_7 = 1,16$$

$$T_{T/O,E} = 304900 \text{ N}$$

$$L_{M,h} = 82,75 \text{ US\$/h (Inflation berücksichtigt)}$$

Als Ergebnis ergibt sich 5160 US\$ für $C_{M,E,L,f}$.

Weiterhin werden die Anzahl an Passagieren benötigt welche abhängig von der Konfiguration sind. Dabei fehlten zum Teil die Angaben, in welchen Verhältnissen sich die unterschiedlichen Klassen befinden. Es werden ähnliche Informationen zum Aufbau des Triebwerkes benötigt die jedoch anders verrechnet werden als bei der AEA- und der DLH-Methode. Vorteilhaft ist, dass der Flugzeugpreis nicht betrachtet wird. Die Flugzeuge mit mehr Triebwerken bei den Mittelstreckenflugzeugen haben wie bei der Jenkinson-Methode, ausgenommen von dem A318, geringere Wartungskosten.

5.3 Trendbetrachtung der Triebwerkswartungskosten

Unter der Vernachlässigung der AI-Methode werden in Bild 5.17 und Bild 5.18 die Methodenübergreifenden Ergebnisse dargestellt. Die AI-Methode wird aufgrund stark abweichender Ergebnisse nicht in die Betrachtung einbezogen. Dabei wird bei den Langstreckenflugzeugen (Bild 5.17), unter Vernachlässigung der MD11-ER, ein Trend der Triebwerkswartungskosten pro Flugstunde in Abhängigkeit der Triebwerksanzahl sichtbar. Zweistrahlige Flugzeuge haben dabei im Durchschnitt Wartungskosten in Höhe von 458 US\$ pro Flugstunde. Je weiterem Triebwerk kommen 35,5 US\$ pro Flugstunde hinzu. Dies kann mit folgender Gleichung ausgedrückt werden: $C_{M,E,f} = 32,5n_E + 392,8$ [US\$/t_f]. Auffallend ist, dass bei der ATA67- Methode und der Methode nach Jenkinson die Dreisträhler höhere Wartungskosten als die Vierstrahler besitzen.

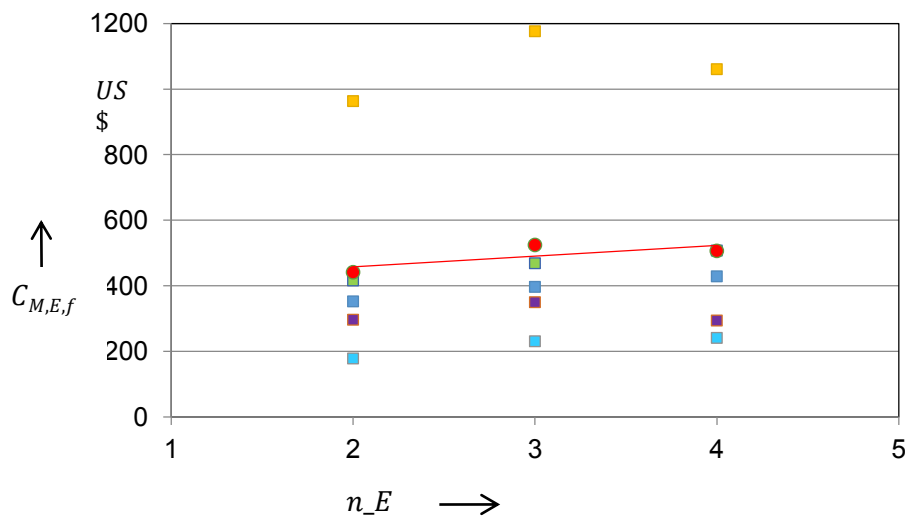


Bild 5.18 Trend der Triebwerkswartungskosten von Langstreckenflugzeugen

- $C_{M,E,f}$ Triebwerkswartungskosten pro FH
- AEA-Methode
 - Methode nach Jenkinson
 - TUB-Methode
 - ATA67-Methode
 - DLH-Methode
 - Mittelwert der Methoden

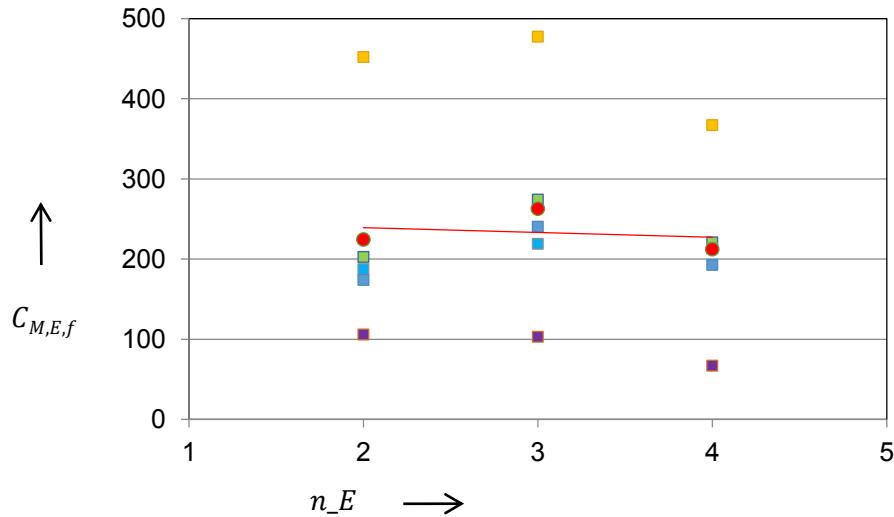


Bild 5.19 Trend der Triebwerkswartungskosten von Mittelstreckenflugzeugen

- $C_{M,E,f}$ Triebwerkswartungskosten pro FH
- AEA-Methode
 - Methode nach Jenkinson
 - TUB-Methode
 - ATA67-Methode
 - DLH-Methode
 - Mittelwert der Methoden

Bei den Mittelstreckenflugzeugen ist im Durchschnitt eine negative Entwicklung der Wartungskosten zu erkennen. Hier besitzen, mit Ausnahme der Methode nach Jenkinson, die Dreistrahler in allen Methoden die höchsten und die Vierstrahler die geringsten Wartungskosten pro Flugstunde. Der Trend bei den Mittelstreckenflugzeugen lässt sich mit folgender Gleichung ausdrücken: $C_{M,E,f} = -6,1n_E + 251,4$ [US\$/t_f].

Bei den zweistrahligen Flugzeugen liegen die Triebwerkswartungskosten zwischen Langstrecke und Mittelstrecke näher beieinander. Die zusätzlichen Triebwerkswartungskosten pro weiterem Triebwerk verändern das Ergebnis dabei nur wenig. Die ATA67-Methode erzielt bei beiden Streckenarten die höchsten Kosten. Die DLH-Methode hat die niedrigsten Triebwerkswartungskosten bei den Langstreckenflugzeugen. Bei den Mittelstreckenflugzeugen sind die Ergebnisse der Methode nach Jenkinson am kleinsten.

6 Betrachtung weiterer Triebwerkskonfiguration

6.1 Distributed Propulsion

Distributed Propulsion, aus dem Englischen für verteilte Antriebskraft, ist eine Methode der Triebwerksverteilung an einem Flugzeug. Dabei werden viele Triebwerke an dem Flügel verteilt wobei diese den gleichen Vortrieb liefern sollen und somit deutlich kleiner gestaltet werden können siehe Bild 6.1. Das könnte die Produktionskosten, den Lärm sowie die Startstrecke verringern.

Der Grund für die vielen kleinen Triebwerken ist unter anderen, dass es schwierig ist ein großes Flugzeug mit wenigen leistungsstarken Triebwerken zu entwickeln und herzustellen.



Bild 6.1 Beispiel für Distributed Propulsion (Polenta 2015)

6.1.1 Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Triebwerksanzahl

Die erhöhte Anzahl sorgt auch für erhöhte Wahrscheinlichkeit beim Ausfall eines oder mehrere Triebwerke. Die Ausfallraten sind nur den Herstellern und den Operatoren bekannt. Eine Annahme von einer Ausfallrate von 0,01 % zeigt die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten eines oder mehrerer Triebwerke.

Laut FAR25 darf ein Triebwerk beim Start ausfallen. Eine weitere Bedingung ist, dass laut FAR25 §25.130 zur Versorgung wichtiger elektrischer Installationen bei Drei- und Vierstrahlern nicht mehr als 2 Triebwerke ausfallen dürfen.

Die Wahrscheinlichkeiten werden mit Formel 6.1 ausgerechnet

$$p_{ges} = n_E(1 - p)^{n_E - 1} \cdot p \quad (6.1)$$

Die Formel geht auf die Binominalverteilung zurück. Zur Berechnung für den Ausfall zwei Triebwerke wurde eine eigene Formel verwendet. Die von **Chan 2008** gewählte Binominalverteilung wurde nicht gewählt, da bei Ausfall eines Triebwerkes anschließend erneut 20 statt 19 Triebwerke betrachtet werden nach dem Prinzip „Ziehen mit zurücklegen“. Um dies zu berücksichtigen wurde Formel 6.2 entwickelt.

$$p_{ges} = n_E \cdot (1 - p)^{n_E - 1} \cdot p \cdot ((n_E - 1)(1 - p)^{n_E - 2} \cdot p) \quad (6.2)$$

Dabei ist zu erwarten, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit steigt da die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten bei Ausfall eines Triebwerkes reduziert wird. Dies belegt Tabelle 6.1.

Merkmal	Triebwerkskonfiguration				
	2 Strahler	3 Strahler	4 Strahler	10 Strahler	20 Strahler
Ausfallwahrscheinlichkeit eines Triebwerkes	0,02 %	0,02999 %	0,03999 %	0,09991 %	0,1996 %
Ausfallwahrscheinlichkeit Zwei Triebwerke Lt. Chan	$1 \cdot 10^{-6}$ %	$3 \cdot 10^{-6}$ %	$5,999 \cdot 10^{-6}$ %	$4,496 \cdot 10^{-5}$ %	$1,897 \cdot 10^{-4}$ %
Ausfallwahrscheinlichkeit Zwei Triebwerke	$2 \cdot 10^{-6}$ %	$5,998 \cdot 10^{-6}$ %	$1,12 \cdot 10^{-5}$ %	$8,985 \cdot 10^{-5}$ %	$3,786 \cdot 10^{-4}$ %

Die Wahrscheinlichkeiten steigen mit zunehmender Anzahl der Triebwerke. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von zwei Triebwerken ist deutlich geringer, steigt jedoch schneller an bei mehreren Triebwerken als der Anstieg beim Ausfall eines Triebwerkes bei mehreren montierten Triebwerken steigt.

6.1.2 Schub-Gewichtsverhältnis bei Ausfall eines zweiten Triebwerkes

Da laut Zertifizierung ein Triebwerk beim Start ausfallen darf, steigt die Gefahr der Überschreitung dieses Grenzwertes bei ansteigender Triebwerksanzahlen, sodass eine neue Überlegung der Zertifizierung für Flugzeuge mit vielen Triebwerken sinnvoll ist.

Der Anteil des Schubes der bei einem Ausfall mehrerer Triebwerke verloren geht sinkt mit zunehmender Triebwerksanzahl weshalb diese grundsätzlich ein geringeres Schubgewichtsverhältnis aufweisen als Flugzeuge mit wenig Triebwerken siehe Bild 2.7.

Die Formel 6.3 beschreibt die Reduktion des Schub-Gewichtsverhältnis bei Ausfall eines zweiten Triebwerkes in Bezug auf den Ausfall eines Triebwerkes.

$$\Delta \frac{T_{TO}}{m_{MTO} \cdot g} (n_E - 1) = \left(\frac{n_E}{n_E} \right) \left(\frac{1}{L/D} + \sin \gamma \right) - \left(\frac{n_E}{n_E - 1} \right) \left(\frac{1}{L/D} + \sin \gamma \right) \quad (6.3)$$

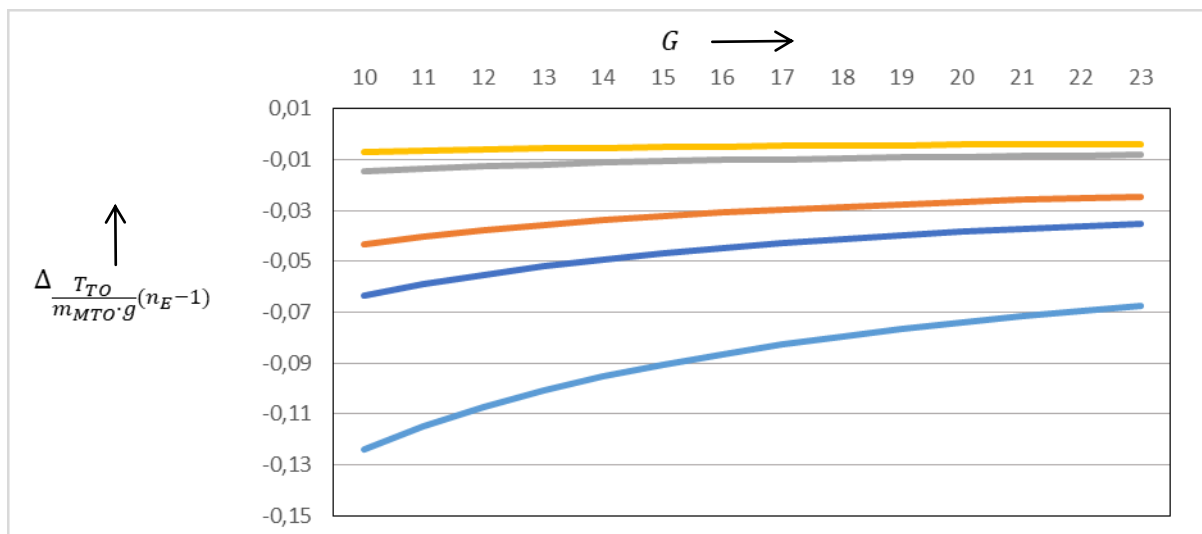


Bild 6.2 Schubgewichtsverhältnisreduzierung bei Ausfall eines Triebwerks

- Zweistrahler
- Dreistrahler
- Vierstrahler
- Zehn Triebwerke
- 20 Triebwerke

Das Bild 6.2 zeigt, dass der Anteil des Schubes der bei einem Ausfall eines Triebwerks verloren geht mit zunehmender Triebwerksanzahl sinkt, weshalb diese grundsätzlich ein geringeres Schubgewichtsverhältnis aufweisen müssen, als Flugzeuge mit wenig Triebwerken. Eine gute Aerodynamik besitzt ebenfalls die Möglichkeit die Reduktion zu verringern wobei sie mit zunehmender Triebwerksanzahl an Einfluss verliert.

Da jedoch mehr Triebwerke eine erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit mit sich bringt, siehe Kapitel 6.1.1, wird die Möglichkeit des Ausfalles eines zweiten Triebwerkes betrachtet.

Die Formel 6.4 beschreibt die Reduktion des Schub-Gewichtsverhältnis bei Ausfall eines zweiten Triebwerkes im Bezug auf den Ausfall eines Triebwerkes.

$$\Delta \frac{T_{TO}}{m_{MTO} \cdot g} (n_E - 2) = \left(\frac{n_E}{n_E} \right) \left(\frac{1}{L/D} + \sin \gamma \right) - \left(\frac{n_E}{n_E - 2} \right) \left(\frac{1}{L/D} + \sin \gamma \right) \quad (6.4)$$

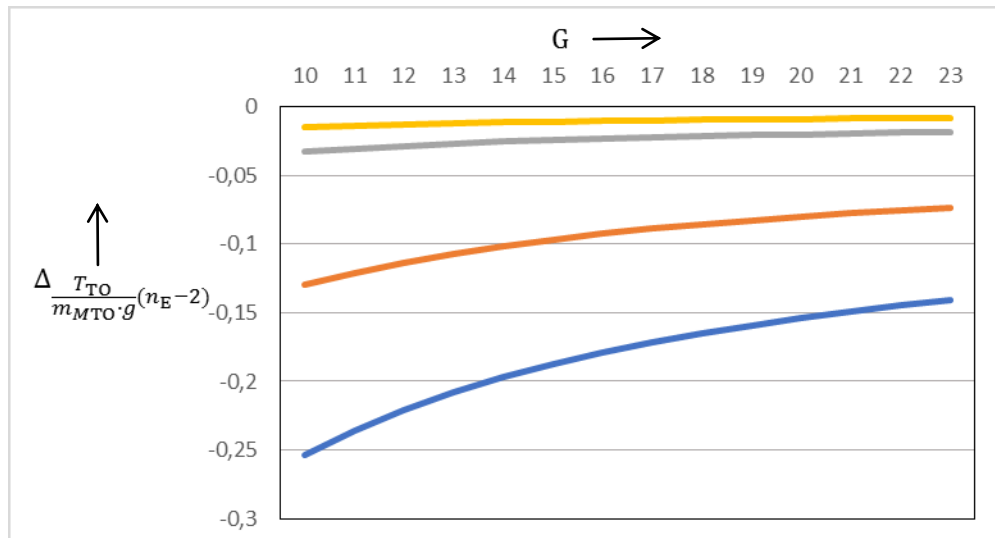


Bild 6.3 Schubgewichtsverhältnisreduzierung bei Ausfall zweier Triebwerke

- Dreistrahler
- Vierstrahler
- Zehn Triebwerke
- 20 Triebwerke

Diese Formel ist anwendbar für Flugzeuge mit weniger als 3 Triebwerken und ist in Abhängigkeit der Gleitzahl im Diagramm 6.3 dargestellt. Dabei ist die Reduktion des Schubgewichtsverhältnisverlustes gestiegen im Vergleich zu einem Triebwerksausfall. Dies würde, bei einer Zertifizierungsänderung zu einer Vergrößerung der Triebwerke führen. Wobei die Erhöhung der Triebwerksanzahl und die daraus resultierende Verkleinerung der Triebwerke den dominierenden Effekt darstellt.

6.1.3 Operationelle Aspekte

Da beim Start, wie in Kapitel 2.3 erwähnt, mit Ausfall eines Triebwerkes gerechnet werden muss kann es hinsichtlich des Abfluggewichtes zu Restriktionen kommen, wenn die Umwelteinflüsse es nicht erlauben, die Anforderungen einzuhalten. Dies gilt besonders bei Hot and High Airports und bei Zweistrahlern. Die Tabelle 6.2 zeigt den geringen Luftdruck bei typische Hot and High Flughäfen.

Tabelle 6.2 Hot and High Flughäfen

Flughafen	Einflussgrößen auf die Startleistung			
	Höhe in m über MSL	Startbahnlängen in m	Durchschnittliche Höchsttemperatur in °C	Verhältnis Luftdruck auf Starbahnhöhe bezogen auf den Luftdruck am Boden
Addis Abeba	2334	3800 3700	22,8	0,76377015
Bogota	2550	3800	16	0,73981708
La Paz	3600	4000	17,8	0,655205385

Quellen für die Erstellung der Tabelle 6.2 waren:

(Wikipedia 2018q, Wikipedia 2018p, Wikipedia 2018o, Wikipedia 2017c, Wikipedia 2016a)

Dabei wurde das Verhältnis der Luftdruck auf Startbahnhöhe mit Hilfe der barometrischen Höhenformel (Wikipedia 2018n) Formel 6.5 berechnet.

$$\frac{d(h_{\text{startbahn}})}{d(h_{\text{MSL}})} = e^{\frac{-Mg\Delta h}{RH}} \quad (6.5)$$

Dabei wurden folgende Werte verwendet:

$$R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$M = 0,02896 \text{ kg mol}^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$$

Δh = Höhe Startbahn über MSL

H = durchschnittliche Höchsttemperatur in K

Der Druck und die Temperatur haben nach **Kozulovic 2017** dabei Einfluss auf den eingefangenen Massenstrom der Einfluss auf die Größe des Schubes hat siehe Formel 6.6.

$$\dot{m} = \frac{d_0}{\sqrt{H_0}} Ma_1 \sqrt{\frac{\kappa}{R}} S_1 \left[\frac{1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma_0^2}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma_1^2} \right]^{\frac{\kappa + 1}{2\kappa - 2}} \quad (6.6)$$

Dabei hängt der Massenstrom linear vom Druck ab. In größeren Höhen ist somit geringerer Schub vorhanden was auch im Diagramm (6.4) zu sehen ist. Es zeigt den Schub in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Dabei steigt der Schub bei höheren Machzahlen da der eingefangene Massenstrom zunimmt. Für den Start sind diese Auswirkungen sehr gering da

die Machzahlen gering sind. Der Druckunterschied auf den oben in Tabelle 6.2 genannten Flughäfen ist dominant.

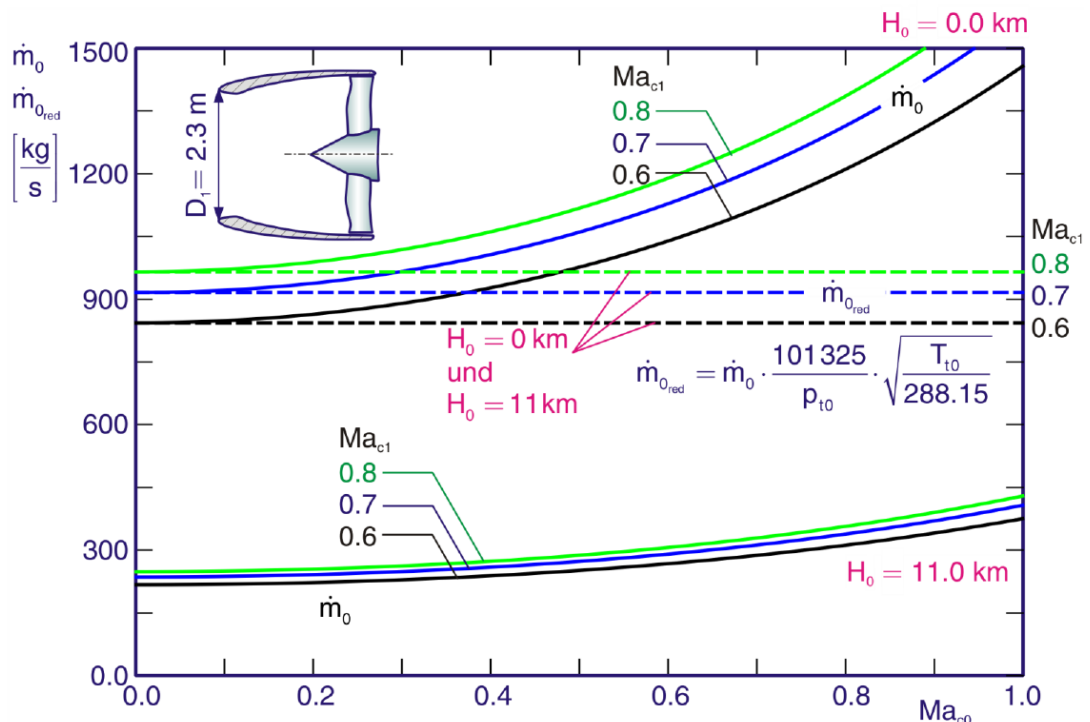


Bild 6.4 Eingefangener Massestrom bei 0 km und 11 km Höhe (Kozulovic 2017, S. 69)

Bei Betrachtung der Flugpläne der Flughäfen aus Tabelle (6.2) fällt auf, dass für Langstrecken häufig vierstrahlige Flugzeuge verwendet werden. Sie sind in der Lage, die Steiganforderungen besser zu erfüllen da bei Ausfall eines Triebwerkes geringerer Schubverlust auftritt siehe Kapitel 2.3. Jedoch fliegen auch viele Zweistrahler von den Flughäfen wobei dabei die kleineren Versionen der Flugzeugfamilien häufiger vorkommen wie der Airbus A318, A319 und A330-200 oder die Boeing 787-800 und 787-900. Häufig besitzt eine Flugzeugfamilie einen ähnlichen Flügel, sodass die kleineren und leichteren Flugzeugen ein größeres Verhältnis aus Flügelfläche zu Gewicht besitzen. Sie können dadurch einfacher steigen.

Diese Flughäfen weisen außerdem eine relativ lange Startbahn auf welche deutlich länger als drei km sind, um längere Beschleunigungsstrecken zu ermöglichen.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Flugzeuge mit verschiedenen Triebwerkskonfigurationen untersucht. Dabei wurde die Erkenntnis aus anderen Studien aufgegriffen, eine möglichst geringe Anzahl von Triebwerken zu installieren. Ein Vergleich der verschiedenen Flugzeuge und die physikalischen Hintergründe zeigten die Grenzen dieses Ansatzes auf.

Weiterhin wurden sechs Methoden, AEA-, TUB-, ATA67-, DLH- AI-Methode und die Methode nach Jenkinson analysiert, beschrieben und anhand eines selbst erstellten Excelprogrammes auf verschiedene Flugzeuge, nach Lang- und Mittelstrecke gegliedert, angewandt. Es wurden Flugzeuge mit zwei, drei und vier Triebwerken untersucht. Dabei wurden die Airframe- und Triebwerkswartungskosten der einzelnen Flugzeuge, sortiert nach Methode, verglichen. Es wurden die Methoden untereinander verglichen und die Anteile der Triebwerkswartungskosten an den Gesamtwartungskosten, die sich aus Airframe- und Triebwerkswartungskosten zusammensetzen, betrachtet. Zur Erklärung der Ergebnisse wurden auch der Gesamtschub und der Flugzeugpreis der Flugzeuge ähnlicher Dimension inspiziert.

Dadurch, dass die Berechnungsmethoden zur Abschätzung der Wartungskosten, Lohnkosten und Flugzeugdaten aus verschiedenen Jahren stammen, war es notwendig Inflationsfaktoren von 1956 bis 2017 zu errechnen. Nur mit Hilfe des Inflationsfaktors war es möglich die Methoden und Flugzeuge untereinander zu Vergleichen.

Die Anpassung der Preise mit Hilfe der Inflation ist nicht ausreichend um die schnell steigenden Kaufpreise der Flugzeuge zu kompensieren. Bei der Differenzierung von Airframe- und Triebwerkspreis wurde, auf Grundlage des Gesamtflugzeugpreises, mit einer Methode von Jenkinson der Triebwerkspreis berechnet, der wieder Inflationsbehaftet war. Die Faustregel, dass die Triebwerke ein Drittel des Kaufpreises des Flugzeuges betragen konnte mit der Rechnung nicht bestätigt werden. Der Anteil liegt bei der gewählten Berechnung nach Jenkinson eher bei 9 % bis 26 %. Die TriStar liegt bei 80 % und die DC8-73 bei 162 %. Dadurch, dass der Triebwerkspreis nur mit Hilfe des Schubs errechnet wird und die älteren Modelle einen geringeren Kaufpreis besitzen wird der Airframnepreis entweder sehr niedrig wie bei der TriStar oder sogar negativ wie bei der DC8-73. Dadurch konnte die DC8-73 in der Auswertung nicht mit betrachtet werden.

Die Ergebnisse der sechs Methoden zeigen keine klare Abhängigkeit der Triebwerksanzahl zu den Wartungskosten. Dies gilt, wenn alle Flugzeuge, die plausible Daten haben, betrachtet werden. Beim Weglassen eines der vier Flugzeuge bei Mittel- und Langstrecke sind bei einigen Methoden jedoch Trends zu erkennen. Bei den Mittelstreckenflugzeugen zeigt nur die AEA-, die AI-Methode und die Methode nach Jenkinson einen Trend. Dieser ist jedoch gegensätzlich zu dem erwarteten Trend, dass die Triebwerkswartungskosten mit der steigenden Anzahl der Triebwerke zunehmen. Bei der Langstrecke zeigen die AEA-, TUB-, DLH- und AI-Methode einen Trend, der bestätigt, dass Flugzeuge mit hoher Anzahl an Triebwerken auch höhere Triebwerkswartungskosten besitzen.

Grundsätzlich besitzen die Langstreckenflugzeuge höhere Wartungskosten als die Mittelstreckenflugzeuge. Die Anteile der Triebwerkswartungskosten an den Gesamtwartungskosten zeigen bei der Betrachtung der Methoden untereinander keinen klaren Trend.

Bei der AEA-Methode liegen für die Langstreckenflugzeugen die Triebwerkswartungskosten zwischen 370 US\$/ t_f und 570 US\$/ t_f . Die Triebwerkswartungskosten für die Mittelstreckenflugzeuge befinden sich zwischen 200 US\$/ t_f und 250 US\$/ t_f . Die Anteile der Triebwerkswartungskosten an den Gesamtwartungskosten betragen zwischen 18 % und 37 %.

Die Triebwerkswartungskosten bei der Methode nach Jenkinson für die Langstrecke liegen zwischen 190 US\$/ t_f und 400 US\$/ t_f und bei der Mittelstrecke zwischen 70 US\$/Flugstunde und 130 US\$/Flugstunde. Die Anteile der Triebwerkswartungskosten an den Gesamtwartungskosten betragen zwischen 13 % und 30 %.

Die Triebwerkswartungskosten bei der TUB-Methode liegen bei beiden Flugstrecken zwischen 180 US\$/ t_f und 250 US\$/ t_f . Hier ist also kein Unterschied zwischen den Triebwerkskosten für Mittel- und Kurzstrecke, wie bei den anderen Methoden, zu identifizieren. Insgesamt hat sie die niedrigsten Triebwerkswartungskosten. Die Anteile der Triebwerkswartungskosten liegen zwischen 15 % und 32 %.

Bei der Langstrecke der DLH-Methode reichen die Triebwerkswartungskosten von 330 US\$/ t_f bis 500 US\$/ t_f , bei den Mittelstreckenflugzeugen zwischen 170 US\$/ t_f und 240 US\$/ t_f . Die Anteile der Triebwerkswartungskosten liegen bei 32 % und 38 %, wobei die DC-8 und die TriStar aufgrund ihrer unseriösen Flugzeugpreise bei 80 % und 90 % liegen.

Bei Mittelstreckenflugzeugen der ATA67-Methode schwanken die Triebwerkswartungspreise zwischen 370 US\$/ t_f und 540 US\$/ t_f . Bei der Langstrecke sogar zwischen 740 US\$/ t_f und 1300 US\$/ t_f . Damit sind die Triebwerkswartungskosten in etwa doppelt so hoch wie die der vorangegangenen Methoden. Die Anteile der Triebwerkswartungskosten an den

Gesamtkosten der Mittelstreckenflugzeuge liegen niedriger als die der Langstrecke zwischen 55 % und 75 %. Die Langstrecke weist bei der TriStar 73 % bis 94 % auf.

Die AI-Methode hat mit Abstand die höchsten Triebwerkswartungskosten. Sie liegen etwa zehn Mal höher als die der AEA-, Jenkinson-, TUB- und DLH-Methode und etwa fünf Mal höher als die der ATA67-Methode. Die Triebwerkskosten der Mittelstrecke bewegen sich zwischen 2300 US\$/Flugstunde und 3600 US\$/Flugstunde und bei der Langstrecke zwischen 4000 US\$/Flugstunde und 7600 US\$/Flugstunde.

Es stellt sich heraus, dass bei der Mittelstrecke die AEA-, TUB- und DLH-Methode vergleichbare Kosten für die Triebwerkswartung errechnen. Bei der Langstrecke werden bei der AEA-, TUB-, Jenkinson- und DLH-Methode ähnliche Triebwerkswartungskosten errechnet. Die Methoden der ATA67 und der AI ergeben deutlich höhere Wartungskosten als die anderen Methoden. Welche Methode jedoch näher an den wirklichen Triebwerkswartungskosten liegen, die nur den Fluggesellschaften vorliegen, kann in dieser Projektarbeit nicht gesagt werden.

Bei dem A330-300 und A340-300 ist bei allen Methoden eine Abhängigkeit zur Triebwerksanzahl erkennen. Da die beiden Flugzeuge ähnliche technische Werte haben, eignen sie sich besonders für die Auswertung.

Problematisch bei der Auswertung waren die unterschiedlichen Dimensionen, die Baujahre der Flugzeuge was das vergleichen der Ergebnisse erschwert. Der Kaufpreis der MD11-ER ist unbekannt und musste deshalb angenommen werden. Der unterschiedliche Bezug auf Block- oder Flugzeit der einzelnen Methoden sowie die Betrachtung vom Aufbau des Triebwerkes welches bei der TUB-Methode und der Methode nach Jenkinson vernachlässigt wird generieren Abweichungen.

Zum Schluss wurde die Distributed Propulsion und ihre Auswirkung auf den Flugbetrieb untersucht. Die Triebwerke können grundsätzlich kleiner gestaltet werden da das benötigte Schubgewichtsverhältnis abnimmt. Jedoch steigt die Wahrscheinlichkeit des Ausfalles eines Triebwerkes. Der dabei entstehende Verlust des Schubes sinkt mit zunehmender Triebwerksanzahl was mehrstrahlige Flugzeuge geeignet für Hot and High Flughäfen macht. Eine Überarbeitung der CS25 bezüglich der Startbedingung für Flugzeuge mit mehr als vier Triebwerken wird als sinnvoll angesehen.

8 Ausblick

Es bestehen weiter Fortsetzungs- und Ausbaumöglichkeiten für dieses Thema. Um noch mehr Erkenntnisse zu erlangen könnte die Flugzeit t_f variiert werden um weitere Flugzeugmissionen zu betrachten. Aber auch die Art der Flugzeuge könnte weiter untersucht werden: So könnten Transportflugzeuge oder Militärflugzeuge hinzugefügt werden, wobei die DOC-Methoden dabei wahrscheinlich etwas angepasst werden müssten. Des Weiteren müsste man sich nicht nur auf Turbofantriebwerke beschränken und könnte vergleichen, wie sich Propellerflugzeuge im Vergleich mit Turbofanflugzeugen bezüglich der Wartungskosten unterscheiden. Die Wartungskosten könnten pro Passagier oder pro Passagierkilometer ermittelt werden. Dies wäre für die Vergleichbarkeit förderlich.

Des Weiteren könnten die vorhandenen Passagierflugzeuge noch durch neuere Flugzeuge wie den A350 oder die Boeing 787 erweitert werden. Bei den ausgewählten Flugzeugen gibt es zum Teil auch noch andere Triebwerk von anderen Herstellern, die die Fluggesellschaft beim Hersteller auswählen kann. Diese besitzen abweichende Triebwerksdaten, wodurch sich die Wartungskosten der Triebwerke und auch die Wartungskosten des Airframes ändern würde. Eine genauere Untersuchung des A330 und des A340 wäre sinnvoll, da sie gut zu vergleichen sind.

Eine weitere Möglichkeit die Ergebnisse der Methoden aussagekräftiger zu machen ist es synthetische Flugzeuge zu erstellen, die auf gleichen Entwurfsparametern basieren und sich nur in der Triebwerksanzahl unterscheiden. Dies würde die Differenzen, die durch verschiedenen Baujahre beziehungsweise der damit einhergehende Stand der Technik, reduzieren.

Außerdem könnten die Formeln zur Triebwerkswartungskostenberechnung nach der Triebwerksanzahl partiell abgeleitet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Schub pro Triebwerk als Gesamtschub dividiert durch die Triebwerksanzahl anzugeben ist.

Um die etwas veralteten Methoden noch besser auf die heutigen Standards anzupassen wäre es möglich eine eigene Methode zu entwickeln. Dafür sollten die Trends der gesamten Methoden betrachtet werden und vor allem die Daten der Fluggesellschaften aber auch der Flugzeug- und Triebwerkshersteller übernommen werden. Nur mit den aktuellen Daten der Fluggesellschaften ist es möglich, eine Methode zu entwickeln die auch realistische Wartungskosten berechnet.

Die Betrachtung von Elektromotoren hinsichtlich der Distributed Propulsion würde weitere Erkenntnisse für neue Flugzeugkonfigurationen erbringen. Dabei ist zu beachten, dass die Anzahl der Komponenten von Elektromotoren geringer als die Komponentenanzahl von

Gasturbinen ist. Ein weiterer Fokus sollte auf die Lebensdauer der Elektrotriebwerke, das Leistungsgewicht und den maximalen Schub gelegt werden.

Literaturverzeichnis

- AA 1990** GRAYSON, Keith: *A New Method for Estimating Transport Aircraft Direct Operation Costs*, American Airlines, 1989. – Maintenance & Engineering Center, Tulsa, Oklahoma 74151, USA
- AEA 1989** ASSOCIATION OF EUROPEAN AIRLINES: *Long Range Aircraft AEA Requirements*. AEA, Avenue Louise 350. Bte 4, 1050 Brussels, Belgien, 1989. – Report No. G(T)5655
- AI 1989** COPPEE, R.: *Airbus Project D.O.C. Method*, Airbus Industrie, 1989. – Technology and New Product Development Directorate, Memo No. AI/TA-P 812.076/88 ISS.1
- Airbus 2017a** AIRBUS: *A330 Airplane Characteristics for Aiprot Planning*, 2018. – URL: <http://www.airbus.com/aircraft/support-services/airport-operations-and-technical-data/aircraft-characteristics.html> (2018-04-12)
- Airbus 2017b** AIRBUS: *A340 Airplane Characteristics for Aiprot Planning*, 2018. – URL: <http://www.airbus.com/aircraft/support-services/airport-operations-and-technical-data/aircraft-characteristics.html> (2018-04-12)
- Airbus 2018** AIRBUS: *A318 Airplane Characteristics for Aiprot Planning*, 2018. – URL: <http://www.airbus.com/aircraft/support-services/airport-operations-and-technical-data/aircraft-characteristics.html> (2018-04-12)
- Airbus Archiv 2018** AIRBUS: *ODs Airbus Commercial Aircraft*, 2018. – URL: <https://archive.org/details/ODsAirbusCommercialAircraftDecember2017> (2018-03-14)
- Aircraftcompare 2015** AIRCRAFTCOMPARE.COM: *Yakovlev Yak-42*, 2015. – URL: <https://www.aircraftcompare.com/helicopter-airplane/Yakovlev-Yak-42/480> (2018-03-14)
- Airliners 2018** AIRLINERS.NET: *Historical List Prices: Boeing And Airbus*, 2018. – URL: <http://www.airliners.net/forum/viewtopic.php?t=561643> (2018-03-14)

- ATA 1967** AIR TRANSPORT ASSOCIATION OF AMERICA: *Standard Method of Estimating Comparative Direct Operating Costs of Turbine Powered Transport Airplanes*, 1967
- Boeing 1989** BOEING COMMERCIAL AIRPLANES: *DC-8 Series Airplane Characteristics for Airport Planning*, 1989. – URL: <https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/dc8.pdf> (2018-04-12)
- Boeing 2013** BOEING COMMERCIAL AIRPLANES: *737 Airplane Characteristics for Airport Planning*, 2013. – URL: <https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/737.pdf> (2018-04-12)
- Boeing 2018** BOEING: *2018 Orders and Deliveries*, 2018. – URL: <http://www.boeing.com/commercial/#/orders-deliveries> (2018-03-15)
- Chan 2008** CHAN, Nicholas Y.S: *Scaling Considerations for Small Aircraft Engines*. Cambridge Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, Thesis, 2008. – URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/45236>
- Civil-Aviation 2018** <http://www.civil-aviation.net/flugzeuge/a340.phtml> (2018-03-14)
- DLH 1982** DEUTSCHE LUFTHANSA: *DLH Method 1982 for Definition of the Performance and Direct Operating Costs of Commercial Fixed Wing Aircraft*. Lufthansa, 1982
- EASA 2010** EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Bae 146 / AVRO 146-RJ Series Type Certificate Data Sheet*, 2010. – URL: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-TCDS-A.182_Bae_146---AVRO_146_RJ-02-20102010.pdf (2018-04-12)
- EASA 2011** EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Type Certificate Data Sheet*, 2011. – URL: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-TCDS-E.007_\(IM\)_General_Electric_CF6--80E1_Series_engines-02-25102011.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-TCDS-E.007_(IM)_General_Electric_CF6--80E1_Series_engines-02-25102011.pdf) (2018-03-14)

- Flugzeuginfo 2017a** PALT, Karsten: *Airbus A330-300*, 2017. – URL: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a330_300_dt.php (2018-03-14)
- Flugzeuginfo 2017b** PALT, Karsten: *Airbus A340-300*, 2017. – URL: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a340_300_dt.php (2018-03-14)
- Flugzeuginfo 2017c** PALT, Karsten: *Boeing 737-800*, 2017. – URL: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_7378_dt.php (2018-03-14)
- GE Aviation 2018** GE AVIATION: *CF6-80E1 High-Bypass Turbofan Engines*, 2018. – URL: <https://www.geaviation.com/sites/default/files/datasheet-CF6-80E1.pdf> (2018-03-14)
- Herrmann 2010** HERMANN, Steffen: *Untersuchung des Einflusses der Motorzahlen auf die Wirtschaftlichkeit eines Verkehrsflugzeuges unter Berücksichtigung eines optimalen Bypassverhältnisses*. Berlin, TU Berlin, Diplomarbeit, 2010
- Herrmann 2011** HERRMANN, Steffen: Untersuchung des Einflusses der Motorzahlen auf die Wirtschaftlichkeit eines Verkehrsflugzeuges unter Berücksichtigung eines optimalen Bypassverhältnisses. In: Tagungsband, 60. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (Bremen, 27.–29.09.2011), 2011. – Paper Nr. 241483, CD, ISBN 978-3-932182-74-X, Abstract: URL: http://www.dglr.de/fileadmin/dglr_veranstdoku/dlrk2011/Papers/241483a.pdf
- Hoeveler 2018** HOEVELER, Patrick; EBNER, Ulrike: Schubgiganten (Teil 2) Platz 10: Rolls-Royce Trent 772-60. In *Flugrevue*, 2018. – URL: <https://www.flugrevue.de/flugzeugbau/triebwerke/top-10-die-staerksten-flugzeugtriebwerke-platz-10-ge-aviation-cf6-80e1a3/525572?seite=2> (2018-03-14)
- Inflation 2018** INFLATION.EU: *Historische Inflation Deutschland - VPI Inflation*, Triami Media, 2018. – URL: <http://de.inflation.eu/inflationsraten/deutschland/historische-inflation/vpi-inflation-deutschland.aspx> (2018-03-14)

- IPFS 2016** *Honeywell LF 507*, IPFS, 2016. – URL: https://ipfs.io/ipfs/QmXoypizjW3WknFiJnKLwHCnL72vedxjQkDDP1mXWo6uco/wiki/Honeywell_LF_507.html und https://en.wikipedia.org/wiki/Lycoming_ALF_502 (2018-03-15)
- Jenkinson 1999** JENKINSON, L. R.; SIMPKIN, P.; RHODES, D.: *Civil Jet Aircraft Design*. London : Arnold, 1999. –
- Kozulovic 2016** KOŽULUVIĆ, Dragan: *Flugzeugprojekt – Flugzeugtriebwerke*. Hamburg, HAW Hamburg, Vorlesungsskript, 2016
- Kozulovic 2017** KOŽULUVIĆ, Dragan: *Flugzeugtriebwerke*. Hamburg, HAW Hamburg, Vorlesungsskript, 2017
- Lackes 2017** LACKES, Richard; SIEPERMANN, Markus: *Grundlagen der Wirtschaftsinformatik*. Springer-Gabler, 2005 <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/75911/wartungskosten-v9.html> (2018-02-25)
- McDonnell Douglas 1996** MCDONNELL DOUGLAS: *MD-11 Airplane Characteristics for Aiprot Planning*, 1998. – URL: <http://www.md-11.org/iac/FC.pdf> (2018-04-12)
- Maierhofer 2015** MAIERHOFER, Roman: *Yakovlev Yak-42 – Mit dem Trijet nach Sankt Petersburg*, 2015. – URL: <https://www.austrianwings.info/2015/01/yakovlev-yak-42-mit-dem-kurzstreckentrijet-nach-sankt-petersburg/> (2018-04-12)
- Scholz 1999** SCHOLZ, Dieter: *Flugzeugentwurf*. Hamburg, HAW Hamburg, Vorlesungsskript, 1999. – URL: <http://fe.ProfScholz.de>
- Steinke 2017** STEINKE, Sebastian: Boeing erhöht die Listenpreise. In: *Flugrevue*, 2017. – URL: <https://www.flugrevue.de/zivilluftfahrt/flugzeuge/boeing-erhoeht-die-listenpreise/717592> (2018-03-14)
- Thorbeck 2013** THORBECK, Jürgen: *DOC-Assessment Method*. Berlin, TU Berlin, Vorlesungsskript, 2013. – URL: http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Aero/TU-Berlin_DOC-Method_with_remarks_13-09-19.pdf

- Polenta 2015** POLENTA, Valerio: *What will future aircraft look like?* Blog Post, University of Nottingham, 2015-02-23. – URL: <http://blogs.nottingham.ac.uk/innovate/2015/02/23/what-will-future-aircraft-look-like> with picture: "Example of distributed propulsion" (Lewis Research Center, Aircraft Propulsion, 1970). URL: <http://blogs.nottingham.ac.uk/innovate/files/2015/02/DP.png> (2018-02-17)
- Van Bodegraven 1990** VAN BODEGRAVEN, George, W. (Boeing Commercial Airplanes, Seattle, WA, USA): Commercial Aircraft DOC Methods. In: American Institute of Aeronautics and Astronautics: AIAA/AHS/ASEE Aircraft Design, Systems and Operations Conference (Dayton, September 17-19, 1990), AIAA, Washington, D.C., USA, 1990. – Paper No. 90-3224, <https://doi.org/10.2514/6.1990-3224>
- Wikipedia 2016a** *Hot and high*, 2016. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Hot_and_high (2018-03-15)
- Wikipedia 2016b** *Distributed propulsion*, 2016. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_propulsion (2018-03-15)
- Wikipedia 2017a** *CFM International CFM56*, 2017. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/CFM_International_CFM56 (2018-03-14)
- Wikipedia 2017b** *Iwtschenko Progress D-36*, 2017. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Iwtschenko_Progress_D-36 (2018-03-14)
- Wikipedia 2017c** *Flughafen El Alto*, 2017. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Flughafen_El_Alto (2018-03-15)
- Wikipedia 2017d** *Flugzeuggewicht*, 2017. – URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Flugzeuggewicht> (2018-03-15)
- Wikipedia 2018a** *Airbus A340*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Airbus_A340 (2018-03-14)

- Wikipedia 2018b** *Airbus A330*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Airbus_A330#A330-300 (2018-03-14)
- Wikipedia 2018c** *General Electric CF6*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/General_Electric_CF6 (2018-03-14)
- Wikipedia 2018d** *McDonnell Douglas MD-11*, 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/McDonnell_Douglas_MD-11 (2018-03-14)
- Wikipedia 2018e** *Rolls-Royce RB211*, 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce_RB211 (2018-03-14)
- Wikipedia 2018f** *Lockheed L-1011 TriStar*, 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_L-1011_TriStar (2018-03-14)
- Wikipedia 2018g** *Jakowlew Jak-42*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Jakowlew_Jak-42 (2018-03-14)
- Wikipedia 2018h** *Boeing 737*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Boeing_737 (2018-03-14)
- Wikipedia 2018i** *CFM International CFM56*, 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/CFM_International_CFM56#CFM56-2_series (2018-03-15)
- Wikipedia 2018j** *Douglas DC-8*, 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Douglas_DC-8#Variants (2018-03-15)
- Wikipedia 2018k** *British Aerospace 146*, 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/British_Aerospace_146 (2018-03-15)
- Wikipedia 2018l** *Airbus-A320-Familie*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Airbus-A320-Familie#Technische_Daten (2018-03-15)
- Wikipedia 2018m** *Lycoming ALF 502*, 2018. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lycoming_ALF_502 (2018-03-15)

- Wikipedia 2018n** *Barometrische Höhenformel*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Barometrische_Höhenformel (2018-03-15)
- Wikipedia 2018o** *Flughafen Bogotá*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Flughafen_Bogot%C3%A1 (2018-03-15)
- Wikipedia 2018p** *Flughafen Addis Abeba*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Flughafen_Addis_Abeba (2018-03-15)
- Wikipedia 2018q** *Addis Abeba*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Addis_Abeba#Geographie (2018-03-15)
- Wikipedia 2018r** *General Electric CF6*, 2018. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/General_Electric_CF6 (2018-03-15)
- Wikipedia 2018s** *Verkehrsflugzeuge*, 2018. – URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsflugzeug> (2018-03-15)
- Wischermann 2013** WISCHERMANN, Babara; WEBER, Jürgen; PIEKENBROCK, Dirk: *Kosten*, 2013. – URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54284/kosten-v7.html> (2018-02-25)