

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

# Tripbasierte Kostenabschätzung für den unbemannten Luftfrachttransport im Nutzlastbereich von einer Tonne

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

**Dipl.-Ing. Andreas Schumacher**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Fabian Leonhardsberger**

01227409

Amraser Straße 44 / Top 5

6020 Innsbruck

Innsbruck, im März 2019

A handwritten signature in black ink, reading 'Leonhardsberger Fabian'.

Leonhardsberger Fabian



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Innsbruck, im März 2019

A handwritten signature in black ink, reading 'Leonhardsberger Fabian', written in a cursive style.

---

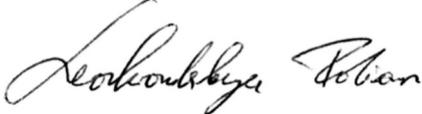
Leonhardsberger Fabian

## Danksagung

Ich möchte mich sehr herzlich bei Herrn Berndt Liebhardt für die Betreuung seitens des DLR und bei Herrn Andreas Schumacher sowie Herrn Prof. Sihn für die Betreuung seitens der TU Wien bedanken. Weiters gilt ein besonderer Dank Herrn Klaus Lütjens der mit mir die Chance gegeben hat meine Arbeit am DLR zu verfassen.

Ein ganz besonderer Dank gilt außerdem meinen Eltern, die mich immer in all meinen Zielen unterstützt haben und mir die denkbar beste Ausbildung ermöglicht haben.

Innsbruck, im März 2019



---

Leonhardsberger Fabian

---

## Kurzfassung

Durch den zivilen Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen konnten in den letzten Jahren vielfältige Aufgabenstellungen effizienter, ökonomischer und umweltfreundlicher durchgeführt werden. Der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen zum Transport von Fracht stellt dabei ein immer wieder angedachtes Anwendungsfeld dar.

Der zivile Transport von Fracht mit einer Gesamtmasse von etwa einer Tonne mit einem unbemannten Luftfahrzeug über mehrere hundert Kilometer ist in dieser Form weltweit neuartig. Die Betriebskostenstruktur stellt für eine Transportlösung ein wesentliches Merkmal dar. Neben den Eigenschaften Transportdauer und Zuverlässigkeit hat sie letztendlich großen Einfluss hinsichtlich des Nutzens und der Wirtschaftlichkeit der Transportlösung. Die Betriebskostenstruktur steht in Interaktion mit einer Vielzahl von externen (nicht beeinflussbaren) und internen (beeinflussbaren) Faktoren. Eine solide Abschätzung des Marktpotentials, die Identifikation realistischer Einsatzszenarien und die kostenorientierte technische Ausgestaltung des Fluggerätes machen eine (frühzeitige) Abschätzung der Betriebskosten daher unabdingbar.

Die vorliegende Arbeit liefert ein Kostenmodell zur Abschätzung der Betriebskosten unter verschiedenen Rahmenbedingungen und ermöglicht so erste quantitative Aussagen über die zu erwartenden Kosten. Der hohen Komplexität der Thematik wird durch eine kombinierte quantitative und qualitative Betrachtung Rechnung getragen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf einer möglichst gesamtheitlichen Modellierung. Das Kostenmodell berücksichtigt dabei eine Vielzahl an Faktoren, resultierend aus Markt, Technologie sowie regulatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen.

Die vorliegende Arbeit stützt sich dafür auf die Kostenträgerstückrechnung und auf die Methodik des Concept Mapping um die komplexe Zusammenhänge der Kostenträgerrechnung darstellen zu können.

Durch konkrete Anwendungsbeispiele konnte die grundsätzliche Eignung des Modells demonstriert werden. Die große Bandbreite der quantitativen Ergebnisse der drei Szenarien zeigt gleichzeitig das größte Problem der Kostenabschätzung zum derzeitigen Zeitpunkt: Die relativ hohe Anzahl der undefinierten Rahmenbedingungen lässt eine quantitative Kostenabschätzung nur unter einer Vielzahl von Annahmen zu. Der Vergleich mit den straßengebundenen Transportmitteln hat gezeigt, dass die Transportkosten, auch im „Best-Case-Szenario“, um ein Vielfaches höher sind. Erst bei weiterer technischer Entwicklung und einer damit einhergehenden Reduktion der Kosten ist an einen wirtschaftlichen Betrieb zu denken.

## Abstract

The civilian use of unmanned aerial vehicles has enabled a variety of tasks to be carried out in a more efficient, economical and environmentally friendly manner in recent years. The use of unmanned aerial vehicles for the transport of freight represents a field of application that has been repeatedly considered.

The civil transport of cargo with a total mass of about one ton with an unmanned aerial vehicle over several hundred kilometres is in this form world-wide new. The operating cost structure is an essential feature of a transport solution, in addition to the transport time and reliability characteristics, it ultimately has a major impact on the utility and cost-effectiveness of the transport solution. The operating cost structure interacts with many external factors (which cannot be influenced) and internal (which can be influenced) factors. A profound estimation of the market potential, the identification of realistic application scenarios and the cost-oriented technical design of the aircraft require an (early) estimation of the operating costs.

This thesis provides a cost model for the estimation of the operating costs under different framework conditions and thus allows first quantitative statements about the expected costs. The high complexity of the topic is considered by a combined quantitative and qualitative analysis. Special attention is paid to a holistic modelling. The cost model considers a variety of factors resulting from the market, technology and regulatory and legal framework conditions.

The present work is based on the methodology of Cost Unit Accounting and the methodology of Concept Mapping.

Through concrete application examples, the basic suitability of the model could be demonstrated. The wide range of quantitative results of the three scenarios also shows the biggest problem of cost estimation: The relatively high number of undefined boundary conditions allows a quantitative estimation of costs only under a variety of assumptions. Comparison with road transport has shown that transport costs are many times higher, even in the best-case scenario. Only with further technical development and thus reduction of costs an economical operation is feasible.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
1.1	Allgemeine Einleitung .....	3
1.2	Problemdefinition und Forschungsfrage .....	3
1.3	Ziel dieser Arbeit.....	4
1.4	Einordnung des Themengebietes.....	4
1.5	Struktur der Arbeit .....	6
2	Fachliche Grundlagen .....	7
2.1	Begriffsdefinitionen .....	7
2.2	Unbemannte Luftfahrtsysteme.....	10
2.2.1	Beispiele für unbemannte Luftfahrzeuge .....	10
2.2.2	Institutionen und Arbeitsgruppen .....	13
2.2.3	Regulatorische Rahmenbedingungen.....	15
2.2.4	Das ALAADy Projekt.....	16
2.3	Luftfracht und Expresslogistik.....	22
2.4	Luftfahrttechnische Grundlagen.....	26
2.4.1	Antriebe.....	26
2.4.2	Treibstoffe .....	27
3	Methodisches Vorgehen .....	33
3.1	Kostenträgerstückrechnung.....	33
3.2	Concept-Map.....	34
4	Kostentheorie im Kontext der Luftfahrt.....	36
4.1	Begriffsdefinition und Charakteristika .....	36
4.2	Kostenrechnungssysteme .....	37
4.3	Plan- bzw. Prognoseorientierte Kostenrechnung.....	37
4.4	Kostenmodelle für unbemannte Luftfahrzeuge .....	38
4.5	Luftfahrtspezifische Kostenmodelle .....	40
4.5.1	Total Operating Costs (TOC) - Modelle.....	40
4.5.2	Kostenmodellierung nach Conklin und de Decker .....	41
4.5.3	Aviation Cost Model (ACOS).....	45
4.5.4	DAPCA-IV nach Gudmundsson .....	46
5	Konzeption der Kostenabschätzung.....	48
5.1	Bezugsobjekt: Transportmission.....	49

---

5.2	Jährliche Nutzung des Fluggerätes .....	52
5.3	Definition des Modelumfanges .....	52
5.4	Kostenverrechnung .....	53
5.5	Fixe direkte operative Gemeinkosten .....	55
5.5.1	Kalkulatorische Abschreibungen .....	55
5.5.2	Kalkulatorische Zinskosten .....	56
5.5.3	Operatorlohnkosten .....	57
5.6	Variable direkte operative Gemeinkosten .....	58
5.6.1	Wartungskosten .....	58
5.6.2	Kalkulatorische Wagniskosten .....	63
5.7	Variable direkte operative Einzelkosten .....	64
5.7.1	Treibstoffkosten .....	64
5.7.2	Start- und Landegebühren .....	67
5.7.3	Datenübertragung .....	67
5.8	Exkurs: Entwicklungs- und Produktionskosten .....	70
5.8.1	Input-Parameter .....	73
5.8.2	Berechnungsbeispiel .....	76
6	Anwendung des Kostenmodells .....	81
6.1	Basis-Szenario .....	82
6.1.1	Die Transportmission und jährliche Nutzung .....	82
6.1.2	Abschätzung nach Kostenarten .....	84
6.1.3	Ergebnisse und Interpretation .....	87
6.2	Best-Case-Szenario .....	88
6.3	Worst-Case-Szenario .....	90
6.4	Transportalternativen: Straßentransport .....	91
6.5	Gegenüberstellung der Transportkosten .....	94
7	Diskussion und Ausblick .....	95
7.1	Ausblick und mögliche Schritte zur Weiterentwicklung .....	96
8	Literaturverzeichnis .....	98
9	Abbildungsverzeichnis .....	105
10	Formelverzeichnis .....	107
11	Tabellenverzeichnis .....	108
12	Abkürzungsverzeichnis .....	109
13	Anhang .....	111

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeine Einleitung

Der zivile Frachttransport mit unbemannten Fluggeräten ist eine immer wieder angedachte Transportlösung. Bisher ist die breite zivile Umsetzung eines solchen Konzeptes allerdings an den technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen gescheitert. Durch eine bevorstehende Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen<sup>1</sup> könnte der breite Einsatz derartiger Transportlösungen erstmals in den Bereich des Möglichen rücken. Daraus resultiert eine Fülle an Möglichkeiten für den zukünftigen Frachttransport über ein breites Spektrum von Nutzlasten und Anwendungen. Im Rahmen Projektes ALAADy prüft das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) die Umsetzbarkeit eines unbemannten Frachtluftfahrzeuges mit einer Nutzlast von etwa 1.000 Kilogramm zum Frachttransport über mehrere hundert Kilometer. Neben der technischen und sicherheitstechnischen Fragestellung soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes auch die wirtschaftliche Realisierbarkeit eines derartigen Lufttransportes geprüft werden.

## 1.2 Problemdefinition und Forschungsfrage

Der zivile Transport von Fracht mit einer Gesamtmasse von etwa einer Tonne mit einem unbemannten Luftfahrzeug über mehrere hundert Kilometer ist in dieser Form weltweit neuartig. Ein Kostenmodell zur Abschätzung der Transportkosten für unbemannte Fluggeräte für den Frachteinsatz existiert derzeit nicht. Aus wissenschaftlicher Sicht besteht daher eine Lücke in der Forschung. Eine realistische Abschätzung des Marktpotentials der Transportlösung ist ohne Kostenmodell nur sehr eingeschränkt möglich. Ebenso wenig können mit dem derzeitigen Stand der Wissenschaft die Auswirkungen verschiedener konstruktiver Entscheidungen beim Fluggeräteentwurf auf die Betriebskosten fundiert abgeschätzt werden. Aus praktischer Sicht besteht die Gefahr, dass ein Fluggerät „am Markt vorbei“ entwickelt und gebaut wird oder der Markt falsch eingeschätzt wird. Das ist insbesondere relevant da die technische Entwicklung in Bezug auf die unbemannte Luftfahrt in den letzten Jahren rasant zugenommen hat und unter anderem am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt bereits an der technischen Umsetzung eines solchen Fluggerätes gearbeitet wird.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Siehe Kapitel 2.2.3

<sup>2</sup> Siehe Kapitel 2.2.4

### **Daraus folgt die zentrale Forschungsfrage:**

Welche Kostenfaktoren müssen bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung eines unbemannten Fluggerätes mit einer Nutzlast von einer Tonne berücksichtigt werden und wie können diese zu einer Kostenabschätzung integriert werden?

## **1.3 Ziel dieser Arbeit**

Das Ziel dieser Arbeit lässt sich in folgende Punkte aufschlüsseln:

- Das Kostenmodell soll der **Beantwortung** einer Vielzahl von **Fragestellungen** dienen können. Diese umfassen u.a.:
  - Zu welchem kostendeckenden **Preis** kann eine Transportdienstleistung angeboten werden? (Preisfindung)
  - Welche **Nachfrage** (Fluggeräte, Transportdienstleistung) ist erforderlich, um die Transportdienstleistung zu einem gewünschten Preis anbieten zu können?
  - Welche **Konkurrenzfähigkeit** ist gegenüber Transportalternativen, wie zum Beispiel dem Warentransport per LKW, gegeben?
- Es soll möglich sein, **erste quantitative Aussagen** über die zu erwartenden Betriebskosten zu treffen.
- Die **zentralen Einflussfaktoren** resultierend aus:
  - Markt (Nachfrage)
  - Technologie (Triebwerke, etc.)
  - Regulatorische und rechtliche Rahmenbedingungensollen **explizit berücksichtigt** werden.

## **1.4 Einordnung des Themengebietes**

Der unbemannte Luftfrachttransport ist ein relativ neuartiger Themenbereich. Insbesondere die Kostenabschätzung hat einen neuartigen Charakter zumal bisher noch keine unbemannten Fluggeräte in der Nutzlastklasse von einer Tonne für den kommerziellen Frachttransport eingesetzt werden.

Teilbereiche der unbemannten Luftfahrt wie z.B. die verwendete Technologie zur Steuerung des Fluggerätes oder die regulatorischen Rahmenbedingungen, haben erheblichen Einfluss auf die Kostenstruktur und die Kostenmodellierung. Der Entwurf und Bau eines unbemannten Fluggerätes erfordert allerdings keineswegs einen völligen Neuentwurf aller Komponenten. Vielmehr kann in vielen Bereichen auf bestehende Lösungen zurückgegriffen werden. Ein zentrales Beispiel dafür sind die Triebwerke. Erkenntnisse, über die von diesen Technologien bzw. Komponenten verursachten bzw. beeinflussten Betriebskostenanteile sind also sowohl auf

Komponenten- als auch auf Systembasis (bemannter Fluggeräte) für die hier vorliegende Arbeit von Relevanz.

Ein weiteres angrenzendes Themengebiet ist der Luftfrachtmarkt. Aus diesem resultieren einerseits eine Reihe an Anforderungen an das Fluggerät selbst, andererseits Einflussfaktoren wie Nachfrage, welche einen erheblichen Einfluss auf die Betriebskosten haben.

Die vierte thematische Säule dieser Arbeit stellen die in der Luftfahrt verwendeten Modelle der Kostenrechnung dar.

Aus diesen Zusammenhängen wird klar, dass es sich bei der betrachteten Thematik nicht um den Teilbereich eines Forschungsfeldes handelt und somit dessen Bearbeitung eine kombinierte Betrachtung technischer sowie wirtschaftlicher Aspekte erforderlich macht.

Einen Überblick der in dieser Arbeit berücksichtigten angrenzenden Themengebiete liefert Abbildung 1.

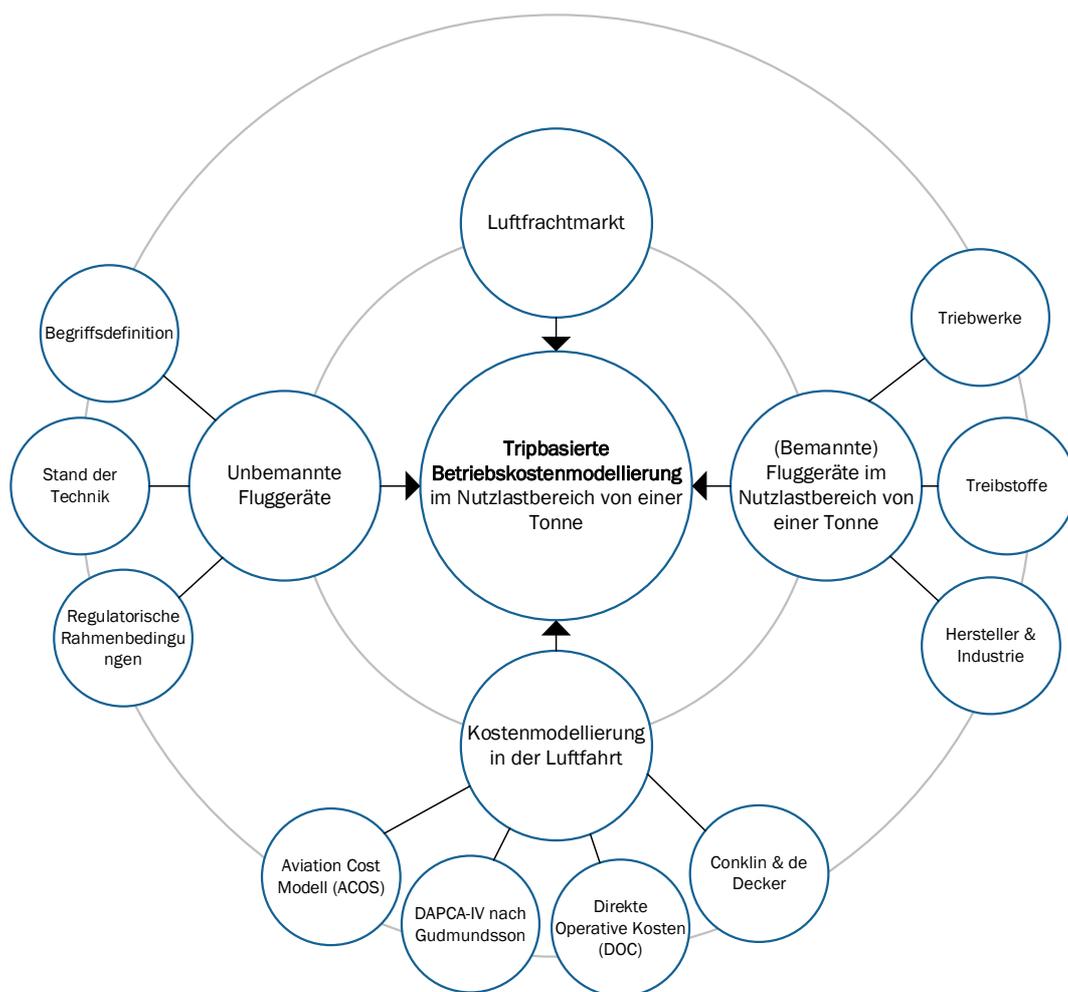


Abbildung 1: Angrenzende Themengebiete<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Eigene Darstellung

## 1.5 Struktur der Arbeit

Nachfolgende zum ersten Kapitel (Einleitung) gliedert sich diese Diplomarbeit in sieben weitere Abschnitte:

- Das **2. Kapitel** (Fachliche Grundlagen) soll dem Leser einen Überblick über unbemannte Luftfahrtsysteme, dem Forschungsprojekt ALAADy, den für den Nutzlastbereich von einer Tonne relevanten luftfahrttechnischen Grundlagen sowie den Luftfrachtmarkt vermitteln.
- **Kapitel 3** befasst sich mit der Kostentheorie im Kontext zur Luftfahrt und weist insbesondere auf die Schwierigkeiten der zukunftsgerichteten Kostenmodellierung hin.
- In **Kapitel 4** werden vier relevante luftfahrtspezifische Kostenmodelle vorgestellt. Die Kostenmodelle unterscheiden sich dabei sowohl im Detailgrad, im Anwendungsfokus (Nutzlastbereich, private bzw. gewerbliche Luftfahrt etc.) als auch in ihren Modellierungszielen. Teilaspekte dieser Kostenmodelle werden in weiterer Folge in Kapitel 6 aufgegriffen.
- **Kapitel 5** beschreibt die Methodik der vorliegenden Arbeit.
- In **Kapitel 6** wird schrittweise die Kostenabschätzung beschrieben, die basierend auf den Erkenntnissen der vorausgegangenen Kapitel erstellt wurde.
- In **Kapitel 7** wird die zuvor erarbeitete Kostenabschätzung anhand konkreter Szenarien angewendet und so quantitative Erkenntnisse gewonnen. Zudem erfolgt in diesem Kapitel der Kostenvergleich mit straßengebundenen Transportmitteln.
- **Kapitel 8** bildet mit der Interpretation und Bewertung der Resultate sowie den möglichen Schritten zur Weiterentwicklung der Kostenabschätzung den Abschluss dieser Arbeit.

## 2 Fachliche Grundlagen

### 2.1 Begriffsdefinitionen

#### Unbemannte Luftfahrzeuge

Im Folgenden werden die wichtigsten Begrifflichkeiten in Zusammenhang mit unbemannten Luftfahrzeugen erklärt. Es gilt zu beachten, dass in der Luftfahrt englischsprachige Begriffe dominieren und eine Übersetzung ins Deutsche nicht immer sinnvoll und/oder gebräuchlich ist. In der Literatur werden zudem oft Abkürzungen verwendet. Im Folgenden wird daher auf die Begriffsdefinition und einige zugehörige Abkürzungen im Detail eingegangen.

Der englische Begriff **Unmanned Aircraft (UA)** wird für ein Fluggerät verwendet, das dazu bestimmt ist ohne menschlichen Piloten an Board betrieben zu werden.<sup>4</sup> Die deutsche Übersetzung lautet **unbemanntes Luftfahrzeug**.<sup>5</sup>

Der Begriff **Unmanned Aircraft System (UAS)** umfasst neben dem unbemannten Luftfahrzeug zusätzlich alle weiteren Systemelemente, die für einen sicheren Betrieb notwendig sind (z.B.: Bodenstation, Datenlink, etc.).<sup>6</sup> Die deutsche Übersetzung lautet **unbemanntes Luftfahrzeug System**.<sup>7</sup>

Die Bezeichnung **Drohne** wird bevorzugt in Zusammenhang mit militärischen unbemannten Fluggeräten verwendet.<sup>8</sup>

Unbemannte Luftfahrzeuge können zudem in ferngesteuerte und autonome Fluggeräte unterteilt werden. Diese Unterteilung ist allerdings nicht trennscharf. Zu Überschneidungen kommt es, wenn ferngesteuerte Fluggeräte auch autonome Flugsegmente ausführen oder wenn autonome Fluggeräte auch ferngesteuerte Flugsegmente ausführen.<sup>9</sup> Siehe dazu auch Abbildung 2.

Der Begriff **Remotely Piloted Aircraft (RPA)** bezeichnet ein unbemanntes Fluggerät, welches von einer Bodenstation aus gesteuert wird. Der Begriff **Remotely Piloted Aerial System (RPAS)** umfasst neben dem RPA auch die Bodenstation und den Command & Control link.<sup>10</sup>

---

<sup>4</sup> vgl. Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems: JARUS Glossary (2018), S.88, [http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar\\_del\\_jarus\\_glossary\\_v0.7\\_0.pdf](http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_del_jarus_glossary_v0.7_0.pdf) (gelesen am 09.02.2019)

<sup>5</sup> vgl. ebenda, S.89

<sup>6</sup> vgl. [https://www.uavdach.org/?page\\_id=184](https://www.uavdach.org/?page_id=184) (gelesen am 29.01.2019)

<sup>7</sup> vgl. ebenda

<sup>8</sup> vgl. Klußmann und Malik (2012), S.60

<sup>9</sup> vgl. International Civil Aviation Organization: Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (2015), S.28, [http://www.caa.ro/media/docs/RPAS\\_ICAO\\_Manual.pdf](http://www.caa.ro/media/docs/RPAS_ICAO_Manual.pdf) (gelesen am 09.02.2019)

<sup>10</sup> ebenda, S.20

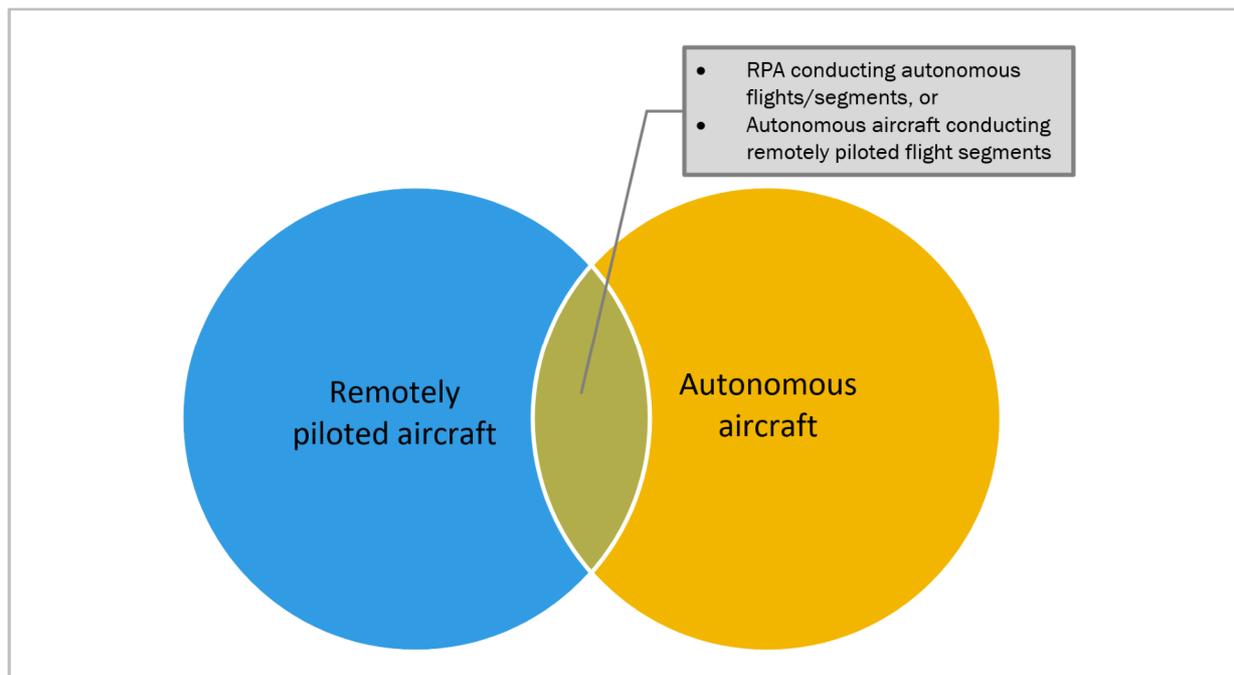


Abbildung 2: Einteilung unbemannter Luftfahrzeuge<sup>11</sup>

### Line-of-Sight (LOS)

Die Visual-Line-of-Sight beschreibt einen Zustand, bei dem der Pilot Sichtkontakt zum unbemannten Fluggerät hat. In Bezug auf die Funkverbindung zwischen Bodenstation und Fluggerät wird auch der Begriff Radio-Line-of-Sight verwendet. In diesem Fall besteht eine direkte Funkverbindung zwischen der Bodenstation und dem Fluggerät.<sup>12</sup>

### Command & Control link (C2 link)

Wird das Fluggerät ferngesteuert so ist eine Verbindung zwischen der Bodenstation und dem Vehikel zur Übertragung von Kommando- und Kontrollsignalen erforderlich. In der Literatur wird diese meiste als „Command & Control link“ oder „C2 link“ bezeichnet.<sup>13 14</sup>

### Detect-and-Avoid (DAA)

Unbemannte Fluggeräte die mit Detect-and-Avoid Technologie ausgestattet sind können andere Fluggeräte in der näheren Umgebung automatisch detektieren und Kollisionen durch gezielte Ausweichmanöver verhindern.<sup>15</sup>

<sup>11</sup> vgl. International Civil Aviation Organization: Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (2015), S.28, [http://www.caa.ro/media/docs/RPAS\\_ICAO\\_Manual.pdf](http://www.caa.ro/media/docs/RPAS_ICAO_Manual.pdf) (gelesen am 03.02.2019)

<sup>12</sup> vgl. International Civil Aviation Organization: Unmanned Aircraft Systems (2011), S.12, [https://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_en.pdf) (gelesen am 20.01.2017)

<sup>13</sup> vgl. ebenda, S.12

<sup>14</sup> vgl. ebenda, S.11

<sup>15</sup> vgl. Valavanis und Vachtsevanos (2015), S.2158

## **Allgemeine Luftfahrt (AL) / General Aviation (GA)**

Der Begriff Allgemeine Luftfahrt umfasst alle zivilen Flüge, die nicht dem Linienverkehr zuzuordnen sind, und stellt somit die Individualverkehrskomponente der Luftfahrt dar.<sup>16</sup>

In diesem Kontext relevant ist auch der englische Begriff General Aviation (abgekürzt GA), der von der General Aviation Manufacturers Association wie folgt definiert wird: „*General aviation is defined as all aviation other than military and scheduled commercial airlines*“.<sup>17</sup> Die General Aviation Manufacturers Association ist die globale Interessenvertretung der GA Industrie.<sup>18</sup>

Diese Begriffe sind für diese Arbeit relevant da die Nutzlastklasse von etwa einer Tonne vor allem durch Fluggeräte der Allgemeinen Luftfahrt geprägt ist.

## **Blockzeit und Flugzeit**

Als Blockzeit wird die Dauer zwischen dem Entfernen der Bremsklötze (engl. block), dem sogenannten „Off-block“ am Abflugort und dem Anlegen der Bremsklötze, dem sogenannten „On-block“ am Zielort bezeichnet. Mit dem Entfernen der Bremsklötze werden i.d.R. auch die Triebwerke gestartet. Der Begriff Flugzeit kann gemäß den Regeln der IACO und JAR analog verwendet werden.<sup>19</sup>

---

<sup>16</sup> vgl. <https://aopa.de/wir-ueber-uns/> (gelesen am 27.01.2017)

<sup>17</sup> General Aviation Manufacturers Association: General Aviation Statistical Databook & 2015 Industry Outlook (2014), S.2, [http://gama.aero/wp-content/uploads/GAMA\\_2014\\_Databook\\_LRes-LowRes.pdf](http://gama.aero/wp-content/uploads/GAMA_2014_Databook_LRes-LowRes.pdf), (gelesen am 05.01.2017)

<sup>18</sup> vgl. ebenda, S.2

<sup>19</sup> vgl. Klußmann und Malik (2012), S.36

## 2.2 Unbemannte Luftfahrtsysteme

### 2.2.1 Beispiele für unbemannte Luftfahrzeuge

Derzeit befindet sich kein unbemanntes Luftfahrzeug für den Transport von Fracht und Nutzlast von mehreren hundert Kilogramm in kommerziellen Einsatz. Zwei der wichtigsten Vertreter dieser Nutzlastklasse stellen die überwiegend militärisch genutzten Modelle K-Max und General Atomics Predator dar.

#### Kaman Unmanned K-Max



Abbildung 3: K-Max mit Schlingenlast<sup>20</sup>

Der Kaman Unmanned K-Max ist ein, vom Rüstungskonzern Lockheed Martin und Kaman Aerosystems entwickeltes, unbemanntes Fluggerät. Als Basis dient der K-1200 Helikopter mit Flettner-Doppelrotor. Der unbemannte K-Max ist als „Optionally Piloted Vehicle (OPV)“ ausgelegt, alternativ zum unbemannten Einsatz bleibt also auch die Einsatzmöglichkeit mit Piloten an Bord erhalten. Der K-Max ermöglicht den Transport von 2,7 Tonnen Außenlast auf Meeresebene.<sup>21</sup>

<sup>20</sup> <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/k-max/K-MAX-brochure.pdf> (20.01.2019), © Lockheed Martin Corporation

<sup>21</sup> vgl. Lockheed Martin Corporation: K-MAX Unmanned Aircraft System (2010), S.1f, <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/k-max/K-MAX-brochure.pdf> (gelesen am 20.01.2019)

Lockheed Martin gibt Brandbekämpfung, Humanitäre Hilfeleistung, Transport von Equipment für die Öl- und Gasindustrie sowie Spezialeinsätze in der Forstwirtschaft als mögliche zukünftige zivile Einsatzmöglichkeiten an.<sup>22</sup>

Bisher wurden mehr als 1900 Flüge für die US-amerikanischen Streitkräfte in Afghanistan durchgeführt und dabei mehr als 2.000 Tonnen Fracht transportiert. Die direkten operativen Kosten werden mit 1.300 US-Dollar pro Flugstunde beziffert.<sup>23</sup>

Abbildung 4 zeigt die nötigen Modifikationen der K-1200 Plattform.



Abbildung 4: Modifikationen der K-1200 Plattform<sup>24</sup>

## General Atomics Predator XP/B und NASA Ikhana

Das US-amerikanische Unternehmen General Atomics hat sowohl für die militärische als auch für die zivile Nutzung eine ganze Modellfamilie an UAVs entwickelt und gebaut. Wichtige Vertreter sind die Modelle Predator XP und Predator B. Die erste Predator Modelgeneration „RQ-1“ wurde erstmal 1996 von den US-amerikanischen Luftstreitkräften mit dem Status „voll einsatzfähig“ in Südostasien und Europa eingesetzt.<sup>25</sup>

<sup>22</sup> vgl. <http://www.lockheedmartin.com/us/products/kmax.html#news> (gelesen am 15.01.2017)

<sup>23</sup> vgl. RAVCO Rota Aviation: K-MAX A Revolutionary Unmanned Aerial System (2012), S.2ff, <https://cdpsdocs.state.co.us/dfpc/Website/CoE/NightOpsSummit/Day2-0815-RAVCOKmaxUAV-youtube-cdps.pdf> (gelesen am 15.01.2017)

<sup>24</sup> vgl. ebenda, S.9, © Lockheed Martin Corporation

<sup>25</sup> vgl. Merlin: Ikhana – Unmanned Aircraft System Western State Fire Missions (2009), S.1ff, <https://history.nasa.gov/monograph44.pdf> (gelesen am 20.01.2019)

Zum heutigen Zeitpunkt haben die Predator B Fluggeräte kumuliert mehr als eine Million Flugstunden bei den Streitkräften der USA, Großbritanniens, Italiens und Frankreichs absolviert.<sup>26</sup> Tabelle 1 liefert einen Überblick über die Spezifikationen dieser Luftfahrzeuge.

	Predator XP	Predator B
Spannweite	17 m	20 m
Länge	8 m	11 m
Triebwerk	Rotax 914 Turbo (modifiziert); 84,5 kW max. Leistung <sup>27</sup>	Honeywell TPE331 – 10 700 kW <sup>28</sup>
Max. Abflugmasse	1.157 kg	4.763 kg
Treibstoffkapazität	270 kg	1.769 kg
Max. Nutzlast	1.47 kg	386 kg (extern) 1.361 kg (intern)
Max. Flughöhe	7.620 m	15.240 m
Max. Fluggeschwindigkeit	120 KTAS (222 km/h)	240 KTAS (444 km/h)
Datenlink	C-Band (LOS) Ku-Band SATCOM (BLOS)	C-Band (LOS) Ku-Band SATCOM (BLOS)
Sonstiges	Dreifach redundantes Flugkontrollsystem  Ferngesteuert der voll autonom  Automatischer Start- und Landevorgang (ATLS)	Dreifach redundantes Flugkontrollsystem  Ferngesteuert oder voll autonom  90 % Verfügbarkeit

**Tabelle 1: Leistungsdaten Predator XP und Predator B<sup>29 30</sup>**

Eine Sonderstellung nimmt der „Certifiable Predator B“ ein. Bei diesem Fluggerät handelt es sich um eine abgeänderte Version des Predator B für den nicht-militärischen Einsatz. Der Certifiable Predator B wird unter anderem vom US-amerikanischen Grenzschutz (U.S. Customs and Border Protection) für die Grenzüberwachung eingesetzt.<sup>31</sup>

<sup>26</sup> General Atomics Aeronautical Systems Inc.: THE SKY'S [NOT] THE LIMIT (2015), S.3, [www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft\\_systems/pdf/capability\\_profile.pdf](http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft_systems/pdf/capability_profile.pdf) (gelesen am 16.01.2017)

<sup>27</sup> Rotax Aircraft Engines: Operators Manual for Rotax Engine Type 914 Series (2010), S.26, [http://contrails.free.fr/fichiers2/914\\_owners\\_man\\_d05240.pdf](http://contrails.free.fr/fichiers2/914_owners_man_d05240.pdf) (gelesen am 16.01.2017)

<sup>28</sup> Honeywell International Inc.: TPE331-10 Turboprop Engine (2006), S.2, [https://aerocontent.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/BA\\_brochures-documents/TPE331.10.pdf](https://aerocontent.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/BA_brochures-documents/TPE331.10.pdf) (gelesen am 16.01.2017)

<sup>29</sup> General Atomics Aeronautical Systems Inc.: Predator XP (2015), S.2, [www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft\\_systems/pdf/PredatorXP021915.pdf](http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft_systems/pdf/PredatorXP021915.pdf) (gelesen am 16.01.2017)

<sup>30</sup> General Atomics Aeronautical Systems Inc.: Predator B (2015), S.2, [www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft\\_systems/pdf/Predator\\_B021915.pdf](http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft_systems/pdf/Predator_B021915.pdf) (gelesen am 16.01.2017)

<sup>31</sup> General Atomics Aeronautical Systems Inc.: Multi-Role – Single Solution (2017), S.2, [http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft\\_systems/pdf/MQ-9B-Capability-Profile-II.pdf](http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft_systems/pdf/MQ-9B-Capability-Profile-II.pdf) (gelesen am 20.01.2019)

Die NASA verfügt mit dem „Ikhana“ ebenfalls über eine auf dem Predator B basierenden Forschungsplattform für zivile Zwecke. Der „Ikhana“ wurde 2007 erfolgreich zur Unterstützung bei der Waldbrandbekämpfung in Kalifornien eingesetzt. Weitere zivile Einsatzmöglichkeiten umfassen die Unterstützung bei Naturkatastrophen.<sup>32</sup>



Abbildung 5: NASA Ikhana basierend auf der Predator B Plattform<sup>33</sup>

## 2.2.2 Institutionen und Arbeitsgruppen

### **EASA (European Aviation Safety Agency / Europäische Agentur für Flugsicherheit)**

Die EASA nimmt in den 28 Mitgliedstaaten der Europäischen Union und in der Schweiz, Norwegen, Island und in Lichtenstein die spezifischen Regulierungs- und Exekutivaufgaben in Bezug auf die Flugsicherheit wahr. Sie wurde durch die Verordnung (EG) Nr. 1592/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates am 15. Juli 2002 gegründet und hat ihren Hauptsitz in Köln. Aus regulatorischer sowie rechtsgebender Sicht umfassen die Aufgabengebiete die Unterstützung der Europäischen Kommission hinsichtlich der Abfassung von Flugsicherheitsregeln und internationalen Abkommen. Die exekutiven Aufgaben umfassen u.a. die Zulassung luftfahrttechnischer Erzeugnisse sowie die mit deren Entwurf, Herstellung und Instandhaltung verbundenen Organisationen.<sup>34</sup>

<sup>32</sup> vgl. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/aircraft/Ikhana/index.html> (gelesen am 20.01.2019)

<sup>33</sup> [https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/ads-b\\_tested\\_on\\_ikhana.html](https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/ads-b_tested_on_ikhana.html) (gelesen am 20.19.2019), © NASA/Tony Landis

<sup>34</sup> vgl. <https://www.easa.europa.eu/the-agency/the-agency> (gelesen am 10.06.2017)

Mit der Verordnung (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Februar 2008, wurde die Zuständigkeit auf die Bereiche: Flugbetrieb, Zulassung von Flugbesatzung und Ausstellung von Genehmigungen für Luftverkehrsgesellschaften aus nicht EU-Ländern erweitert. Auf Basis dieser Verordnung ist die EASA zur Regulierung von unbemannten Fluggeräten für den zivilen Einsatz mit einer Betriebsmasse von mehr als 150 kg ermächtigt. Für unbemannte Fluggeräte mit einer geringeren Betriebsmasse liegt die Zuständigkeit bei nationalen Behörden.

Im Dezember 2015 wurde von der Europäischen Kommission ein Vorschlag für eine neue Verordnung zur Festlegung der Zuständigkeiten der EASA veröffentlicht.<sup>35</sup> Für die vorliegende Arbeit ist dieser Vorschlag von Bedeutung, da dieser die regulatorische Zuständigkeit für unbemannte Luftfahrzeuge unabhängig von der Betriebsmasse an die EASA überträgt und so erstmals einheitliche Rahmenbedingungen in allen Mitgliedsstaaten der EASA geschaffen werden können.

### **FAA (Federal Aviation Administration)**

Die FAA ist ein Teil der US-amerikanischen Department of Transportation und ist für folgende Aufgabengebiete zuständig:<sup>36</sup>

- Regulierung der Zivilluftfahrt zur Förderung der Sicherheit
- Entwicklung und Betrieb eines Systems zur Flugsicherung und Navigation für zivile und militärische Flugzeuge
- Erforschung und Entwicklung des nationalen Luftraumsystems und der zivilen Luftfahrt
- Entwicklung und Durchführung von Programmen zur Bekämpfung des Fluglärms und anderer Umweltauswirkungen der Zivilluftfahrt
- Regulierung des US-amerikanischen kommerziellen Weltraumtransports

Für den praktischen Teil dieser Arbeit sind die Regulierung mit der Bezeichnung „14 CFR PART 23“ und LSA Vorgaben relevant. Die Abkürzung CFR bedeutet „Code of Federal Regulation“.<sup>37</sup> Die PART 23 Regulierung definiert die Lufttüchtigkeitsstandards für Flugzeuge der Allgemeinen Luftfahrt, die LSA (Light Sports Aircraft) Vorgeben sind dagegen für leichte Sportflugzeuge vorgesehen.<sup>38</sup>

---

<sup>35</sup> vgl. Europäische Kommission: Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt (2015), [http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:da8dfec1-9ce9-11e5-8781-01aa75ed71a1.0006.02/DOC\\_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:da8dfec1-9ce9-11e5-8781-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_1&format=PDF) (gelesen am 20.01.2019)

<sup>36</sup> vgl. <https://www.faa.gov/about/mission/activities/> (gelesen am 20.01.2019)

<sup>37</sup> <https://www.archives.gov/federal-register/cfr/about.html> (gelesen am 20.01.2019)

<sup>38</sup> vgl. Gudmundsson (2014), S.21

## JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems)

JARUS ist eine Expertengruppe nationaler und lokaler Luftfahrtbehörden. Insgesamt beteiligen sich 46 Länder sowie die EASA und EUROCONTROL an den Arbeitsgruppen. Ziel ist die gemeinsame Ausarbeitung einheitlicher technischer, sicherheitstechnischer und operationeller Anforderungen für die Zertifizierung von unbemannten Luftfahrzeugen.<sup>39</sup>

## ICAO (International Civil Aviation Organization / Internationale Zivilluftfahrtorganisation)

Die ICAO ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen. Sie wurde 1944 zum Zweck der Administration und Kontrolle des Chicagoer Abkommens gegründet. Das Chicagoer Abkommen bildet die Grundlage des internationalen Luftfahrtrechts auf völkerrechtlicher Basis. Heute hat die ICAO 192 Mitgliedsstaaten. Eine Hauptaufgabe stellt die Konsensbildung zwischen den Mitgliedsstaaten und Industriegruppen hinsichtlich Standards und Empfehlungen für die zivile Luftfahrt dar.<sup>40</sup>

Das Chicagoer Abkommen ist für diese Arbeit vor allem hinsichtlich der Treibstoffbesteuerung von Relevanz, diese wird in Kapitel 2.4.2 dargelegt.

### 2.2.3 Regulatorische Rahmenbedingungen

Das Projekt „ALADy“ vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie die in dieser Arbeit aus regulatorischer Sicht getroffenen Annahmen stützen sich auf die, von der EASA im August 2016 veröffentlichten, „Prototyp“ Regulierung für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten. Dieser Entwurf einer Regulierung befindet sich derzeit in der öffentlichen Begutachtungsphase und hat noch keine Rechtsgültigkeit erlangt.

Mit dieser Regulierung werden erstmals die Rahmenbedingungen für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten in allen Mitgliedsstaaten der EASA vereinheitlicht. Ausschlaggebend für die Sicherheitsbewertung ist dann, das vom Betrieb ausgehende Gesamtrisiko. Dieses Gesamtrisiko wird sowohl von den technischen Eigenschaften des Fluggerätes als auch den betrieblichen Einsatzbedingungen charakterisiert. Grundsätzlich werden drei Kategorien unterschieden:

- „Offen“
- „Spezifisch“
- „Zertifiziert“.<sup>41</sup>

---

<sup>39</sup> vgl. <http://jarus-rpas.org> (gelesen am 15.01.2017)

<sup>40</sup> vgl. <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx> (gelesen am 20.10.2019)

<sup>41</sup> vgl. EASA: Prototype Commission Regulation on Unmanned Aircraft Operations (2016), S.2ff, <https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/UAS%20Prototype%20Regulation%20final.pdf> (gelesen am 16.12.2016)

Die „offene“ Kategorie ist unterteilt in vier risikoabhängig Unterklassen und deckt dabei unbemannte Fluggeräte mit geringen Gefährdungspotential ab. Die Fluggeräte dieser Klasse dürfen den Sichtbereich des Piloten nicht verlassen und je nach Unterklasse bis zu einer maximalen Höhe von 150 Meter aufsteigen. Zudem ist die maximale Abflugmasse auf 25 kg beschränkt und es ist ggf. eine Ausbildung des Piloten erforderlich. Die „spezifische“ Kategorie stellt die, für diese Arbeit relevante, Kategorie dar. Diese Kategorie ist für Fluggeräte vorgesehen, deren Risikopotential über jenes der „offenen“ Kategorie hinausgeht. Es ist eine operationelle Risikobewertung durchzuführen. Diese Risikobewertung muss für jedes Einsatzszenario separat anhand des sogenannten Specific Operations Risk Assessment (SORA) Frameworks durchgeführt werden. Um dies zu erleichtern sieht die EASA die Veröffentlichung einer Reihe von „Standardszenarien“, die einen Großteil aller Einsatzszenarien abdecken sollen, vor. Ist das gewünschte Einsatzszenario nicht durch ein Standardszenario abgedeckt, so muss der Betreiber des UAVs das Einsatzszenario bei einer zuständigen Behörde genehmigen lassen. Alternativ besteht für den Betreiber die Möglichkeit durch den Erwerb des sogenannten „Light UA Operator Certificate“ (LUC) selbstständig Einsatzszenarien bewerten und genehmigen zu dürfen. Die „zertifiziert“ Kategorie rundet das Spektrum nach oben ab. In dieser Kategorie müssen die gleichen Standards wie in der bemannten Luftfahrt eingehalten werden. Dies trifft insbesondere auf die Ausfallwahrscheinlichkeit der Systeme zu.<sup>42</sup>

## 2.2.4 Das ALAADy Projekt

Das Automated Low Altitude Air Delivery Projekt (ALAADy) des DLR befasst sich mit dem automatischen und unbemannten Lufttransport und erstreckt sich beginnend mit Februar 2016 über eine Laufzeit von drei Jahren. Im Zuge dieses Projektes sollen die zur Realisierung eines unbemannten Luftfahrzeugs für den Frachttransport und dessen Betrieb nötigen sicherheitstechnischen Aspekte, betriebliche Rahmenbedingungen, Systemarchitektur und die nötigen Algorithmen betrachtet werden. Das Hauptproblem bei der Realisierung eines solchen Fluggerätes stellt aus technischer Sicht das erforderliche Sicherheitsniveau dar. In Wissenschaft und Industrie zeichnen sich derzeit zwei Vorgehensweisen ab, um das nötige Sicherheitsniveau zu erreichen:

- a) Die High Reliability Configuration (HRC): Erhöhung der Investitionen in Sicherheit und Zuverlässigkeit, um letztlich zukünftig das Zuverlässigkeitsniveau der bemannten Luftfahrt zu erreichen.

---

<sup>42</sup> vgl. EASA: Prototype Commission Regulation on Unmanned Aircraft Operations (2016), S.6ff, <https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/UAS%20Prototype%20Regulation%20final.pdf> (gelesen am 16.12.2016)

- b) Die Minimum Risks Configuration (MRC): Einschränken des Risikos durch betriebliche Maßnahmen wie umfliegen von bewohnten Gebieten und geringe Flughöhe.<sup>43</sup>

Im Zuge des ALAADy Projektes soll die Realisierbarkeit nach MRC Ansatz konzeptionell untersucht werden. Im Einklang mit dem momentanen Stand der Technik, wird eine mittlere Ausfallrate von 5.000 bis 15.000 Stunden angestrebt. Die Nutzlast wurde mit ein bis zwei Tonnen festgelegt. Notlandeeigenschaften und eine relativ geringe Fluggeschwindigkeit von 200 Kilometer pro Stunde sollen zusätzlich der Risikominimierung dienen. Eine Reichweite von 600 bis 900 Kilometer, die festgelegte Nutzlast von ein bis zwei Tonnen und eine nötige Start- und Landebahnlänge von maximal 400 Meter sollen den flexiblen Einsatz gewährleisten. Die Flughöhe wurde mit 150 Meter festgelegt, das Fluggerät soll also im „unregulierten“ Luftraum G operieren, dadurch wird einerseits der Gefährdungsbereich am Boden minimiert und andererseits ein deutlicher Puffer zu anderen Lufträumen gewährleistet. Ein in Kapitel 2.1 beschriebenes Detect & Avoid System soll angedacht werden, um Mid-Air-Kollisionen zu vermeiden. Kohärent sichere Systeme sollen zusätzlich der Wahrung eines hohen Sicherheitsniveaus dienen.<sup>44</sup>

Um den Multidisziplinären Anforderungen der Thematik gerecht zu werden sind am Projekt folgenden sieben DLR Institute beteiligt:

- Institut für Aeroelastik – in Göttingen
- Institut für Flugsystemtechnik – Braunschweig
- Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr – Köln
- Institut für Flugführung – Braunschweig
- Institut für Kommunikation und Navigation – Oberpfaffenhofen-Wessling
- Einrichtung für Lufttransportsysteme – Hamburg
- Institut für Technische Thermodynamik – Stuttgart<sup>45</sup>

## Konfiguration

Unter der Federführung des Instituts für Flugsystemtechnik wurden anfänglich drei im Folgenden dargestellte Fluggeräte-Konfigurationen entworfen. Alle drei Entwürfe entsprechen den oben genannten Projektvorgaben, setzten aber auf verschiedene Technologien / Lösungsansätze. Ein Überblick dieser drei Konfigurationen kann Tabelle 2 entnommen werden.

---

<sup>43</sup> vgl. Dauer (2015), S.6

<sup>44</sup> vgl. ebenda, S.22

<sup>45</sup> vgl. ebenda, S.17



Tabelle 2: Fluggeräte – Konfigurationen<sup>46</sup>

Die **Tragschrauber – Konfiguration** ist wie die drei anderen Konfigurationen für eine Nutzlast von 1.000 Kilogramm ausgelegt und hat eine maximale Abflugmasse von 2.450 Kilogramm. Der Rotor mit einem Durchmesser von 14 Meter arbeitet nach dem Autorotationsprinzip. Für den nötigen Vortrieb sorgen zwei Propeller mit einem Durchmesser von zwei Meter. Die Propeller werden von je einem 200 Kilowatt starken Turboprop-Triebwerk angetrieben. Der errechnete Treibstoffverbrauch für eine 600 Kilometer lange Flugstrecke, geflogen mit einer Geschwindigkeit von 200 Kilometer pro Stunde und einem spezifischen Kraftstoffverbrauch von 0,32 Kilogramm pro Kilowattstunde beträgt etwa 163 Kilogramm Kerosin. Der Tragschrauber weist die kürzeste erforderliche Start- und Landestrecke aller Konfigurationen auf.<sup>47</sup>

Die **Pushpropeller – Konfiguration** hat eine maximale Abflugmasse von etwa 2.400 Kilogramm und sieht ebenfalls eine Nutzlast von 1.000 Kilogramm vor. Als Antrieb ist ein Turboprop-Triebwerk mit 162 Kilowatt sowie vier Elektromotoren mit je 20 Kilowatt Leistung vorgesehen. Das Turboprop-Triebwerk treibt den Pushpropeller an, die Elektromotoren je einen Propeller. Die elektrischen Zusatzantriebe, welche über eine Dauer von max. 10 Minuten eine Zusatzleistung von 80 Kilowatt liefern können, sollen zusätzlichen Auftrieb am Flügel erzeugen und so eine geringere Start- und Landegeschwindigkeit ermöglichen. Der errechnete Treibstoffverbrauch beträgt etwa 120 Kilogramm auf 600 Kilometer.<sup>48</sup>

Die **BoxWing – Konfiguration** sieht die gleiche Nutzlast wie die beiden anderen Konfigurationen vor, ist aber mit einer maximalen Abflugmasse von 2.650 Kilogramm etwas schwerer. Das Fluggerät wird von einem etwa 200 Kilowatt starken Turboprop-Triebwerk angetrieben. Für die Start- und Landephase stehen wiederum insgesamt 200 Kilowatt elektrischer Zusatzleistung zur Verfügung. Die spezielle Flügelform ermöglicht einen relativ geringen induzierten Widerstand, führt allerdings auch zu einer etwas größeren Systemmasse.<sup>49</sup>

<sup>46</sup> Abbildungen entnommen aus: ALAADy Projekt – internes Arbeitspapier, © DLR Institut für Flugsystemtechnik

<sup>47</sup> vgl. Internes Arbeitspapier ALAADy Projekt, Entwurf & Berechnungen wurden vom Institut für Flugsystemtechnik des DLR in Braunschweig durchgeführt und zur Verfügung gestellt.

<sup>48</sup> vgl. ebenda

<sup>49</sup> vgl. ebenda

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Konfigurationen durch das Projektteam wurde die Tragschrauber – Konfiguration von den Projektbeteiligten für die weiteren Untersuchungen am besten geeignet erachtet. Vor allem die universelle Einsetzbarkeit (kurze erf. Start- und Landebahnlänge) sowie die guten Notlandeigenschaften (Autorotation) stellen die entscheidenden Vorteile gegenüber den Alternativen dar.

### Die Tragschrauber – Konfiguration im Detail



Abbildung 6: Tragschrauber-Konfiguration<sup>50</sup>

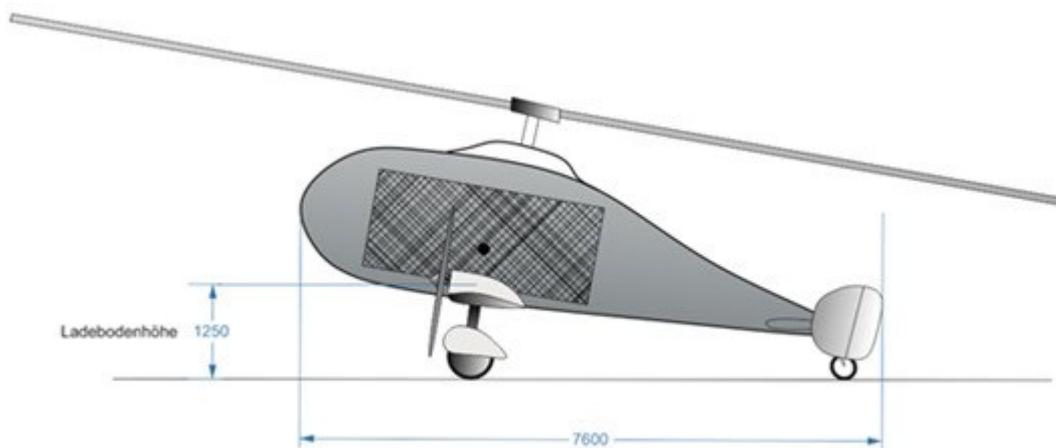
Da diese Konfiguration für die vorliegende Arbeit von besonderer Relevanz ist werden im Folgenden deren technische Daten und Eigenschaften genauer dargestellt. Wie in Abbildung 6 ersichtlich verfügt diese Konfiguration über einen zweiblättrigen Rotor. Neben dem Rotor sorgen die Flügel für etwa 25 bis 30 Prozent des Auftriebes. Die Flügel dienen überdies zur Unterbringung des Treibstoffes. Das Fahrwerk ist als Dreipunktfahrwerk mit Spornrad ausgeführt. Die Beladung erfolgt durch eine Ladeluke im Bug. Der Laderaum ist 1,3 x 1,3 x 3 Meter groß, das Frachtraumvolumen beträgt demnach etwa fünf Kubikmeter. Das Fluggerät benötigt eine sehr geringe Startstrecke von nur ca. 240 Metern. Tabelle 3 zeigt die Leistungsdaten sowie die Massenanteile.<sup>51</sup>

<sup>50</sup> Abbildung entnommen aus: ALAADy Projekt - internes Arbeitspapier, © DLR Institut für Flugsystemtechnik

<sup>51</sup> vgl. internes Arbeitspapier ALAADy Projekt, Entwurf & Berechnungen wurden vom Institut für Flugsystemtechnik des DLR in Braunschweig durchgeführt und zur Verfügung gestellt.

Nutzlast	1000 kg	Struktur-Rumpf	410 kg
Abflugmasse	2450 kg	Leitwerk	80 kg
Reisefluggeschwindigkeit	200 km/h	Flügel	70 kg
Motorleistung	2 x 200kW	Fahrwerk	100 kg
Treibstoff	Kerosin	Rotor	120 kg
Spezifischer Treibstoffverbrauch	0,32 kg/kWh	Rotorkopf + Rotormast	90 kg
Treibstoffbedarf für 600 km	163 kg	Vorrotationsmotor + Getriebe	50 kg
Reservekraftstoff	33 kg	Einbauten	175 kg
Gesamtkraftstoff	196 kg	Triebwerke	130 kg
Minimalgeschwindigkeit	60 km/h	Batterien	30 kg
Aufsetzgeschwindigkeit	80 km/h		

**Tabelle 3: Leistungsdaten und Massenabschätzung der Tragschrauber-Konfiguration<sup>52</sup>**



**Abbildung 7: Tragschrauber Seitenansicht<sup>53</sup>**

<sup>52</sup> vgl. internes Arbeitspapier ALAADy Projekt, Entwurf & Berechnungen wurden vom Institut für Flugsystemtechnik des DLR in Braunschweig durchgeführt und zur Verfügung gestellt.

<sup>53</sup> Abbildung entnommen aus: ALAADy Projekt - internes Arbeitspapier, © DLR Institut für Flugsystemtechnik

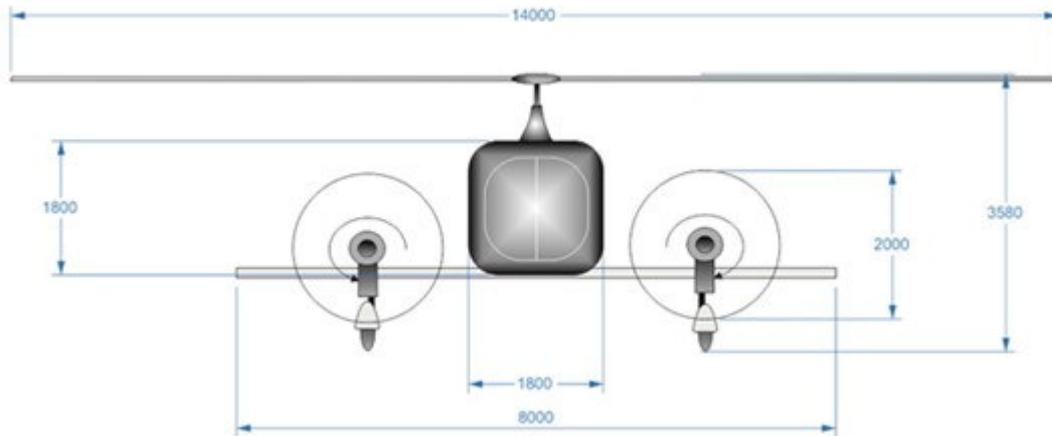


Abbildung 8: Tragschrauber Frontalansicht<sup>54</sup>

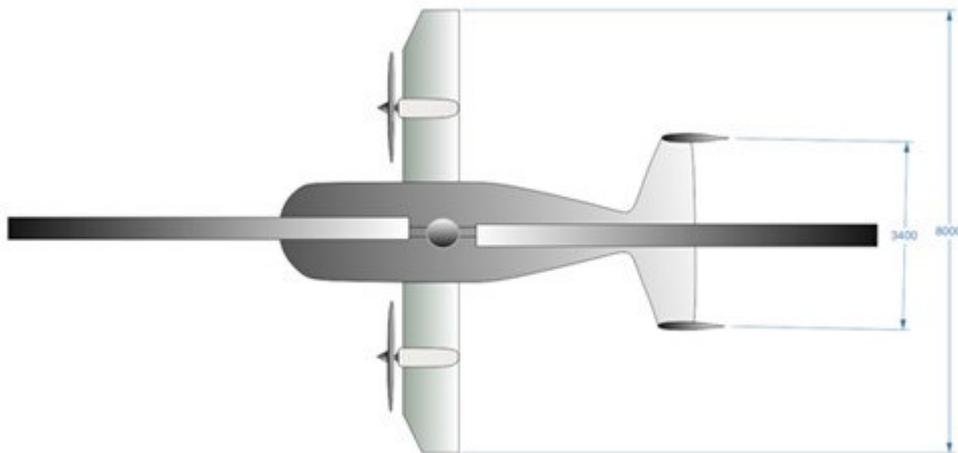


Abbildung 9: Tragschrauber Draufsicht<sup>55</sup>

<sup>54</sup> Abbildung entnommen aus: ALAADy Projekt - internes Arbeitspapier, © DLR Institut für Flugsystemtechnik

<sup>55</sup> ebenda

## 2.3 Luftfracht und Expresslogistik

Im Folgenden soll ein Überblick über die globale Luftfrachtbranche gegeben werden. Wie in Kapitel 1.4 beschrieben haben Marktcharakteristika sowohl auf die Modellierung selbst als auch auf die korrekte Parametrisierung wesentlichen Einfluss.

### Definition Luftfracht

Der Luftfrachtverkehr ist jener Teil des Luftverkehrs deren Zweck die Ortsänderung von Fracht und Post ist. Im technischen Sinne steht der Begriff Luftfracht für alle Frachttransporte in Luftfahrzeugen. Im rechtlichen Sinne bezeichnet Luftfracht alle Gütertransporte, die auf Basis eines Luftfrachtbriefes erfolgen. Dies ist insbesondere für den Luftfrachtersatzverkehr von Relevanz, bei der Fracht per LKW transportiert wird.<sup>56</sup>

Insbesondere bei Statistiken ist daher immer zu hinterfragen ob die Luftfracht tatsächlich über die gesamte Transportdistanz per Luftfahrzeug transportiert wurde. Wie in Abbildung 10 ersichtlich kann Luftfracht gemäß Bernecker & Grandjot nach einer Reihe von Kriterien kategorisiert werden.

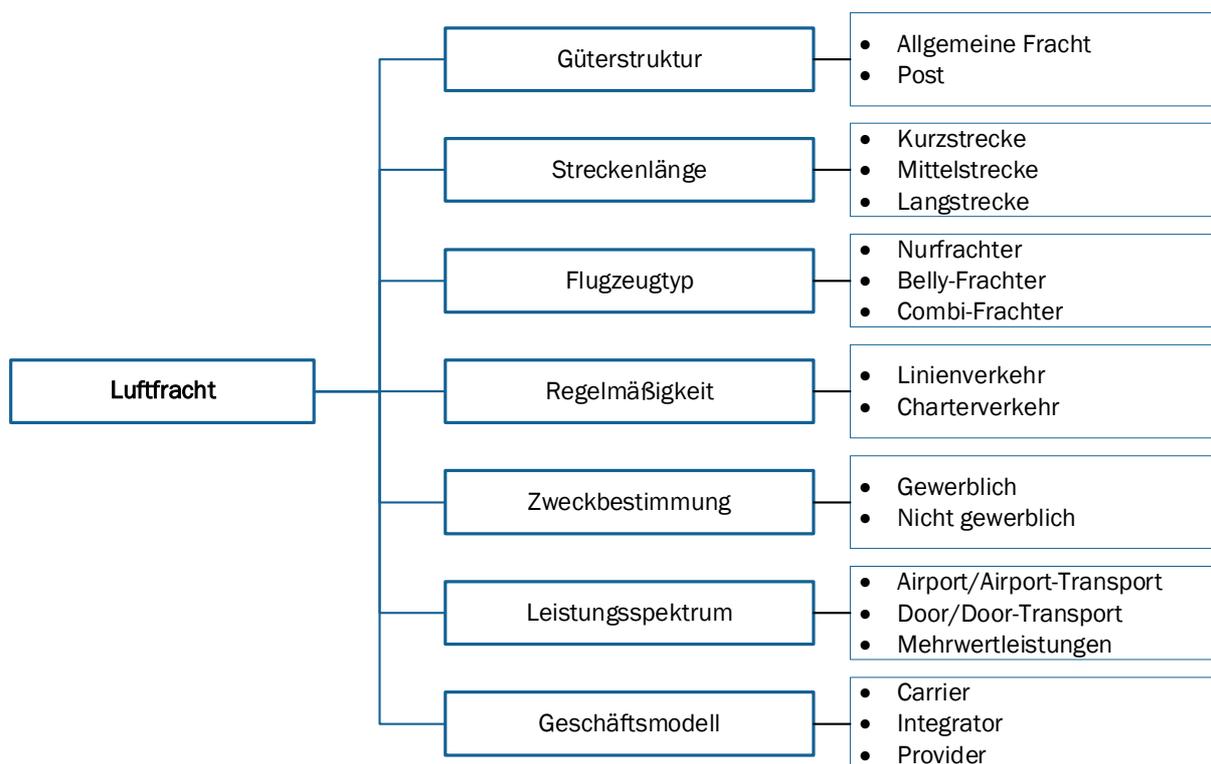


Abbildung 10: Funktionendiagramm der Luftfracht<sup>57</sup>

Die Luftfracht umfasst weniger als ein Prozent der global umgeschlagenen Frachttonnen, nimmt jedoch 35 Prozent des globalen Handelsvolumens ein. Im

<sup>56</sup> vgl. Bernecker und Grandjot (2012), S.16

<sup>57</sup> vgl. ebenda

interkontinentalen Warenverkehr konkurriert das Flugzeug mit der Seeschifffahrt, im kontinentalen Warenverkehr mit dem LKW und der Bahn. In den Jahren 2005 bis 2015 ist der Luftfrachttransport bezogen auf die geleisteten Tonnenkilometer jährlich um durchschnittlich zwei Prozent gewachsen.<sup>58</sup>

Zu den wichtigsten Luftfrachtgütern gehören IT-Produkte, Maschinen und Medikamente. Charakteristisch für die Luftfracht sind:<sup>59</sup>

- Sehr hohe Transportkosten
- Kurze Transportzeiten
- Geringe Transportkapazitäten im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern
- Geringe Verpackungskosten
- Geringe Netzdichte auf Grund der Bindung an Flughafenstandorten.

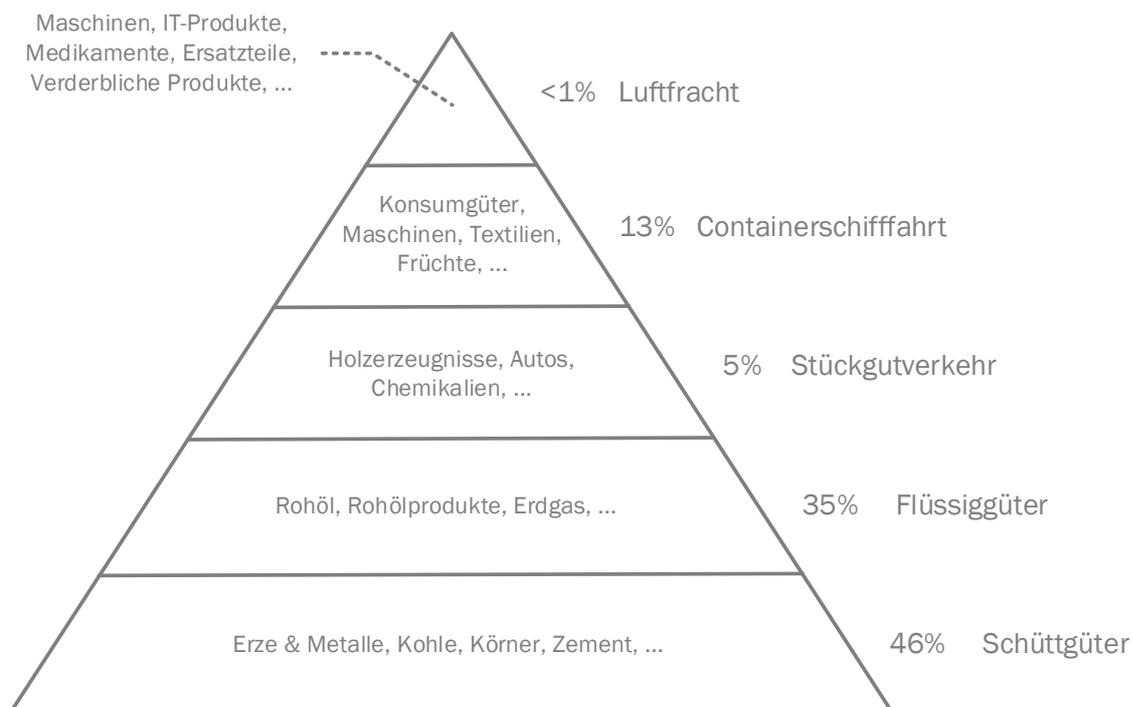


Abbildung 11: Globaler Warentransport<sup>60</sup>

Aus Zeit-, Mengen- und Preissicht lassen sich die Frachtprodukte grob in die drei Kategorien: Standard, Express und Premium bzw. Kurier einteilen. Die mittlere Laufzeit für Standardfracht beträgt 2 bis 4 Tage, die maximale Laufzeit sieben Tage. Bei Express und Premium- bzw. Kurierlieferungen sind die Laufzeiten mit ein bis

<sup>58</sup> vgl. Boeing: World Air Cargo Forecast (2016), S.2, [www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf) (gelesen am 27.03.2017)

<sup>59</sup> vgl. Arnold, Isermann, Kuhn und Furmans (2008), S.758ff

<sup>60</sup> vgl. Boeing: World Air Cargo Forecast (2016), S.8ff, [www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf) (gelesen am 27.03.2017)

maximal drei Tagen wesentlich kürzer. Bei Premium- und Kurierlieferungen beträgt das Maximalgewicht 100 Kilogramm.<sup>61</sup>

Auf Expressfracht spezialisiert sind vor allem die sogenannten Integratoren. Gemessen an den Tonnenkilometern sind die Verbindungen zwischen Asien und Nordamerika, Asien und Europa, Nordamerika und Europa sowie der Transport innerhalb von Nordamerika jene mit den stärksten Verkehrsaufkommen.<sup>62</sup>

### **Netzstruktur und Flughäfen**

Flughäfen können im weltweiten Lufttransportnetz entweder Drehscheibenfunktion (Hub) oder Start- bzw. Zielort für den Lufttransport darstellen. Um eine Vielzahl an Verbindungen wirtschaftlich realisieren zu können werden viele Verbindungen mittels Hub-and-Spoke-System bedient.<sup>63</sup> Nach Frye haben 2012 alleine die 21 größten Flughäfen mehr als 50 Prozent des weltweiten Luftfrachtumschlages geleistet, es besteht eine wesentlich höhere Konzentration als bei Passagieren (61 Flughäfen) und in Bezug auf die Flugbewegungen (104 Flughäfen).<sup>64</sup>

Laut einer von der Europäischen Kommission in Auftrag gegebenen Untersuchung, basierend auf einer Befragung von Luftfrachtkunden, beträgt das Einzugsgebiet eines europäischen Flughafens etwa 800 Kilometer bzw. zwölf Lkw-Stunden. Das Einzugsgebiet für den Passagierverkehr ist dagegen mit ca. 100 Kilometern wesentlich kleiner.<sup>65</sup>

### **Bodentransport**

Die Anlieferung vom Versender zum Flughafen und die Auslieferung vom Flughafen zum Empfänger der Luftfracht wird als Vor- bzw. Nachlauf bezeichnet. Bei Standardfracht wird dieser Transport durch den Spediteur durchgeführt. Bei von Integratoren transportierte Expressfracht wird die gesamte Transportkette durch den Integrator kontrolliert.

Erfolgt ein Bodentransport zwischen zwei Flughäfen im Auftrag der Luftverkehrsgesellschaft so wird diese als Luftfrachtersatzverkehr bezeichnet. Der

---

<sup>62</sup> vgl. Boeing: World Air Cargo Forecast (2016), S.4,  
[www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf) (gelesen am 27.03.2017)

<sup>61</sup> vgl. Arnold, Isermann, Kuhn und Furmans (2008), S.758

<sup>63</sup> vgl. Klußmann und Malik (2012), S.131

<sup>64</sup> vgl. Clausen und Geiger (2013), S.232

<sup>65</sup> vgl. Europäische Kommission: COMMISSION DECISION of 17/12/2008 declaring a concentration to be compatible with the common market and the functioning of the EEA Agreement (2008), S.14f,  
[http://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m5141\\_20081217\\_20682\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m5141_20081217_20682_en.pdf) (gelesen am 20.01.2019)

Luftfrachtersatzverkehr kann direkt in das Buchungssystem der Luftverkehrsgesellschaften eingebunden werden und Flugnummern tragen.<sup>66</sup>

Ein Beispiel für ein weit ausgebautes Luftfrachtersatzverkehrsnetzwerk ist jenes der Lufthansa Cargo, welches u.a. regelmäßige Verbindungen zwischen Lissabon und Frankfurt sowie Helsinki und München beinhaltet.<sup>67</sup>

## Frachtflugzeuge

2015 wurden etwas mehr als 50 Prozent der globalen Luftfrachttonnenkilometer mit reinen Frachtflugzeugen absolviert, der Rest wurde an Bord von Passagiermaschinen transportiert.<sup>68</sup> Für diese Arbeit besonders relevant sind Frachtflugzeuge mit geringeren Nutzlasten und Reichweiten, da diese erste Rückschlüsse für die Abschätzung der potentiellen Nachfrage zulassen.

Die weltweit betriebenen Flugzeuge ab einem maximalen Abfluggewicht von 10.000 Pfund können der Flight Global Datenbank entnommen werden. Laut dieser Datenbank werden weltweit 461 Frachtflugzeuge mit einer maximalen Abflugmasse von 10.000 bis 20.000 Pfund (ca. 4.500 bis 9.000 Kilogramm) betrieben, etwas mehr als dreiviertel davon sind in den USA registriert, elf Prozent in Südamerika und fünf Prozent (23 Maschinen) in Europa. Größte Betreiber von Mustern dieser Gewichtsklasse sind Ameriflight mit 127 Flugzeugen, Alpine Air mit 29 Flugzeugen und Aeronaves TSM mit 26 Flugzeugen.<sup>69</sup>

Ameriflight gibt für Ihre insgesamt aus 215 Flugzeugen bestehend Flotte 525 tägliche Abflüge und „100.000+“ kumulierte jährliche Flugstunden an. Hauptkunden sind die drei Integratoren FedEx, UPS und DHL.<sup>70</sup>

Die global betriebene Frachtflugzeugflotte mit einer maximalen Abflugmasse kleiner als 10.000 Pfund sind in keiner bekannten Datenbank enthalten.

Eine in diesem Zusammenhang nennenswerte Flotte stellen die etwa 250, in Nordamerika im Auftrag von FedEx unter der Bezeichnung FedEx Feeder betriebenen, Cessna 208 (maximale Abflugmasse: ca. 4.000 Kilogramm) dar. Eine Auswertung von McDonald basierend auf BTS (Bureau of Transportation Statistics) Daten ergab für

---

<sup>66</sup> vgl. Mensen (2013), S.20ff

<sup>67</sup> vgl. <http://lufthansa-cargo.com/web/guest/network/schedule-routings> (gelesen am 30.01.2017).

<sup>68</sup> vgl. Boeing: World Air Cargo Forecast (2016), S.4, [www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf) (gelesen am 27.03.2017)

<sup>69</sup> vgl. <https://www.flightglobal.com/products/fleets-analyzer/> (gelesen am 06.01.2017)

<sup>70</sup> vgl. Ameriflight: A Brief Summary (2015), S.4ff, <https://w3.ameriflight.com/wp-content/uploads/2015/10/Ameriflight-Who-We-Are-What-We-Do.pdf> (gelesen am 20.10.2019)

diese FedEx-Teilflotte für das Jahr 2009 eine durchschnittliche Auslastung von 1,1 Flüge pro Tag und 361 Flugstunden pro Jahr.<sup>71</sup>

## 2.4 Luftfahrttechnische Grundlagen

Triebwerke und Treibstoff sind zwei zentrale Kostentreiber in Bezug auf die Betriebskosten. In den nachfolgenden Kapiteln soll auf diese beiden Punkt aus dem Blickwinkel eines Fluggerätes im Nutzlastbereich von einer Tonne eingegangen werden. Insbesondere wird dabei auf die Punkte Kraftstoffbesteuerung und Kraftstoffpreise für Kleinabnehmer eingegangen.

### 2.4.1 Antriebe

Für den Antrieb von Luftfahrzeugen mit den in der Problemstellung definierten Parameter können sowohl Kolbenmotoren als auch Turboprop-Triebwerke verwendet werden.

#### Kolbenmotor

Ein Kolbenmotor in Verbindung mit einem Propeller ist das ältesten in der Luftfahrt eingesetzten Antriebssysteme. Kolbenmotoren für die Luftfahrt wurden mit Leistungen von wenigen bis zu mehreren tausend PS gebaut. Heute kommen diese nur noch bei kleinen Flugzeugen und Helikoptern zum Einsatz. Typischerweise werden dabei Motoren mit 4 bis 6 Zylinder und Leistungen bis 500 Kilowatt eingesetzt.<sup>72</sup>

Ein wesentlicher Nachteil von Kolbentriebwerken ist deren Leistungsabfall mit steigender Flughöhe. Der spezifische Kraftstoffverbrauch gibt Aufschluss über die Effizienz des Motors und hat direkten Einfluss auf die Betriebskosten. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Kenndaten typischer Kolbentriebwerke.

Hersteller	Land	Typ	TBO	Treibstoff	Leistung	Gewicht	Spez. Kraftstoffverbrauch
Textron Lycoming	USA	O-360	2000 h	AvGas	168 -180 PS	Ca. 130 kg	0,6 lb/h/PS
		IO-580	-		315 PS	Ca. 200 kg	
		IO-720	-		400 PS	Ca. 270 kg	
Continental Motors	USA	IO-550	-	AvGas	300-310 PS	Ca. 215 kg	0,6 lb/h/PS

<sup>71</sup> vgl. McDonald: Establishing Mission Requirements Based on Consideration of Aircraft Operations (2013), S.774, <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.C031878McDonald> (gelesen am 05.01.2017)

<sup>72</sup> vgl. Klußmann und Malik (2012), S.143

Rotax Engine	Österreich	914 UL	1200 h	AvGas	115 PS	Ca. 70 kg	-
Austro Engine	Österreich	AE300	1800 h	Diesel	168 PS	185 kg	21 l/h <sup>1</sup>

<sup>1</sup> bei 90 Kilowatt Leistung

**Tabelle 4: Ausgewählte Kolbentriebwerke<sup>73 74 75</sup>**

### Turboprop-Triebwerke

Wird der Propeller durch ein Wellenleistungstriebwerk (bestehend aus Verdichter, Brennkammer und Turbine) angetrieben, so spricht man von einem Turboprop-Triebwerk. Bei dieser Antriebsart vorteilhaft ist der höhere Vortriebswirkungsgrad bei kleinen Fluggeschwindigkeiten und die daraus resultierenden kürzeren Startstrecken.<sup>76</sup>

Einen der wesentlichsten Nachteile bildet der hohe Treibstoffverbrauch.<sup>77</sup> Das am weitesten verbreitete Turboprop-Triebwerk trägt die Bezeichnung PT6 und wird vom kanadischen Unternehmens Pratt & Whitney erzeugt.<sup>78</sup> Die Leistungsdaten dieses Triebwerkes reichen von 500 bis 2.000 PS. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Kenndaten von Turboprop-Triebwerke.

Hersteller	Land	Typ	TBO	Treibstoff	Leistung	Gewicht	Spez. Kraftstoffverbrauch
Pratt & Whitney	Kanada	PT6A-11	-	Kerosin	528 PS	Ca. 140 kg	Ca. 0,65 lb/h/PS
Garrett / Honeywell	USA	TPE331-5/6	-	Kerosin	840 PS	Ca. 163 kg	Ca. 0.63 lb/h/PS

**Tabelle 5: Ausgewählte Turboprop-Triebwerke<sup>79</sup>**

## 2.4.2 Treibstoffe

### Kraftstoffarten

In der kommerziellen Luftfahrt ist Kerosin der wichtigste Kraftstoff, in der allgemeinen Luftfahrt sind zudem Diesel, AvGas (Aviation Gasoline bzw. Flugbenzin) und MoGas (Motor Gasoline) von Bedeutung.

<sup>73</sup> vgl. Gudmundsson (2014), S.192f

<sup>74</sup> vgl. [http://austroengine.at/uploads/pdf/mod\\_products1/AE300\\_Technical\\_Data\\_Sheet.pdf](http://austroengine.at/uploads/pdf/mod_products1/AE300_Technical_Data_Sheet.pdf) (gelesen am 24.01.2017)

<sup>75</sup> vgl. [www.diamond-air.at/de/media-center/presse-meldungen/aktuelles/article/austro-engine-ae300-receives-easa-certificate-for-1800-hour-tbo/](http://www.diamond-air.at/de/media-center/presse-meldungen/aktuelles/article/austro-engine-ae300-receives-easa-certificate-for-1800-hour-tbo/) (gelesen am 16.01.2016)

<sup>76</sup> vgl. Rossow, Wolf und Horst (2014), S.489

<sup>77</sup> vgl. Gudmundsson (2014), S.187f

<sup>78</sup> vgl. <https://www.pwc.ca/en/products-and-services/products/general-aviation-engines/pt6a> (gelesen am 20.01.2019)

<sup>79</sup> vgl. Gudmundsson (2014), S.190f

Kerosin ist ein enger Fraktionierschnitt aus dem Mitteldestillat. Die fast ausschließlich eingesetzte Qualität trägt die Bezeichnung „Jet A-1“.<sup>80</sup> Jet A-1 ist unter der ASTM Spezifikation D 1655 genormt. Einige EASA und FAA zertifizierte Dieselflugmotoren, wie etwa der Centurion CD-155 von Continental Motors, können sowohl mit Dieselmotorkraftstoff als auch mit Kerosin betrieben werden.<sup>81</sup> Benzin ist durch die DIN EN 228 genormt. Die maßgebliche Flugbenzinsorte trägt den Namen AvGas 100 LL. Es handelt sich dabei um verbleites Benzin mit einer höheren Oktanzahl. Die spezifischen Energiegehalte von Diesel, Benzin und Kerosin unterscheiden sich nur geringfügig und liegen bei etwa 43 MJ/kg. Wesentlich beachtlicher sind dagegen die Unterschiede in Bezug auf die Dichten der Treibstoffarten, dies ist insbesondere beim Vergleich von spezifischen Triebwerksverbräuchen zu beachten.

Name	Kfz-Benzin	Kolbenmotor- Flugbenzin	Strahltriebwerks-Brennstoffe				Kfz-Diesel
	MOGAS	AVGAS	Jet B	Jet A	Jet A-1	JP 5	Diesel
Sorte	Super	Gasolin	Wide Cut	Kerosin	Kerosin	Kerosin	-
Englische Bezeichnung	-	Derd 2485	Derd 2486 AVTAG	Derd 2482 AVTUR	Derd 2494 AVTUR	Derd 2498 AVCAT	-
US-Bezeichnung	-	MIL-G-5572	JP 4	JP 1	JP 1A	JP 5	-
Verwendung	Kfz	Luftfahrt	Militär (Zivil)	Zivil (Militär)	Zivil (Militär)	Militär (Marine)	Kfz
Siedebereich in °C	30 ... 210	40 ... 150	50 ... 260	180 ... 260	180 ... 260	180 ... 260	180 ... 320
Dampfdruck in bar	0,75	0,50	0,20	0,01	0,01	< 0,01	< 0,01
Flammpunkt in °C	-48	-40	-20	+38	+38	+65	+70 ... 80
Gefrierpunkt in °C	< -60	< -60	-60	-40	-47	-48	-20
Zündtemperatur in °C	≈ 220	≈ 450	≈ 250	≈ 250	≈ 250	≈ 245	≈ 220
Heizwert in MJ/kg	42,7 / 43,5	43,5	42,8	42,5	42,5	42,6	42,5
Dichte bei 15 °C in kg/dm <sup>3</sup>	0,73 ... 0,78	0,72	0,78	0,81	0,81	0,83	0,83

Abbildung 12: Eigenschaften von Kraftstoffen in der Luftfahrt<sup>82</sup>

### Spotmärkte

Kerosin wird, wie Diesel, aus Rohöl gewonnen. Die Differenz zwischen Rohöl- und Treibstoffpreis an den Spotmärkten (Produktmärkten) wird als Raffineriemarge (engl. Crack Spread) bezeichnet.<sup>83</sup> Abbildung 13 zeigt den Kerosin- und Dieselspotmarktpreis an der US-amerikanischen Golfküste im Vergleich zum Rohölpreis. Aus dem Diagramm lässt sich ein nahezu paralleler Preisverlauf von

<sup>80</sup> vgl. Klußmann und Malik (2012), S.148

<sup>81</sup> vgl. Continental Motors: CD-100 series (o.J.), S.1,

[http://www.continentalmotors.aero/uploadedFiles/Content/xImages/spec\\_CD-100%20series-WEB.pdf](http://www.continentalmotors.aero/uploadedFiles/Content/xImages/spec_CD-100%20series-WEB.pdf) (gelesen am 14.12.2016)

<sup>82</sup> Rossow, Wolf und Horst (2014), S.519

<sup>83</sup> vgl. <https://www.mckinseyenergyinsights.com/resources/refinery-reference-desk/crack-spread/> (gelesen am 27.01.2019)

Diesel und Kerosin und eine Phase von höheren Raffineriemargen in den Jahren 2011 bis 2013 erkennen. Raffineriemargen haben folglich in der Vergangenheit keine zeitlich konstante Größe dargestellt.

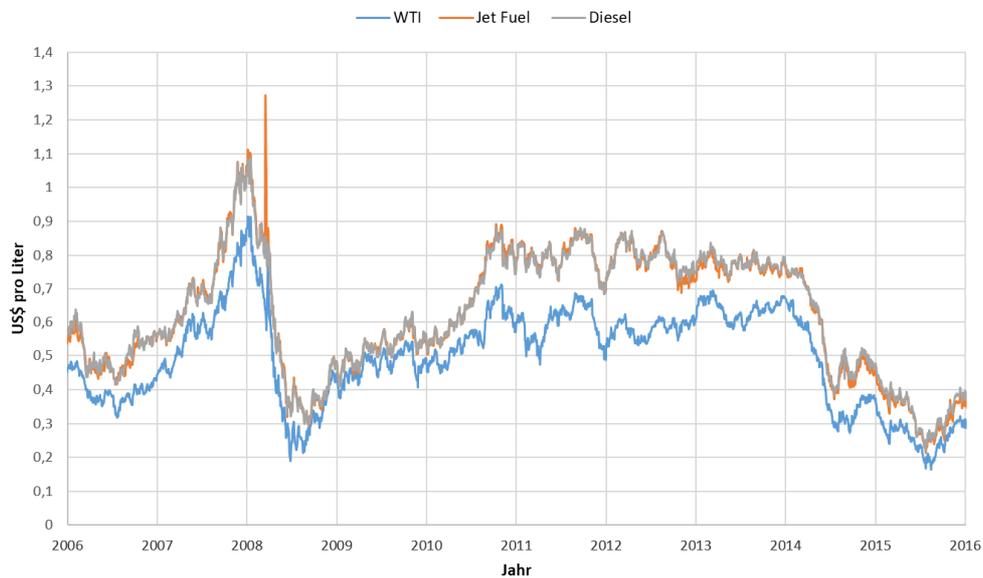


Abbildung 13: Preisverläufe von Rohöl (WTI), Diesel und Kerosin am Golfküstenspotmarkt<sup>84</sup>

In Abbildung 14 ist zusätzlich der Preisverlauf für Benzin aufgetragen. Im Gegensatz zu Diesel und Kerosin gab es für Benzin in der Vergangenheit keinen parallelen Preisverlauf zu anderen Treibstoffen.

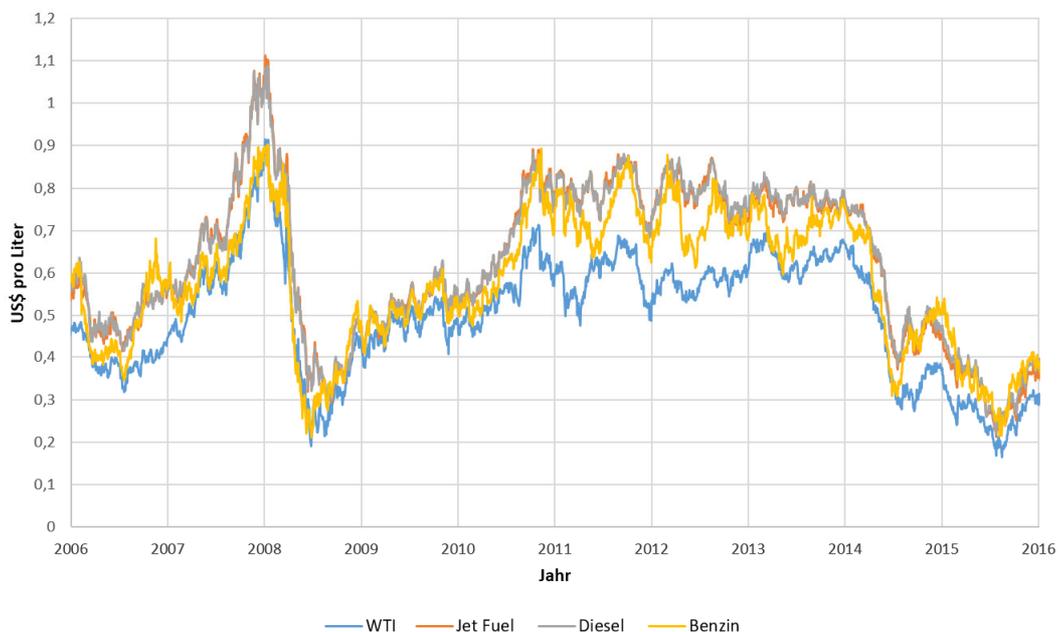


Abbildung 14: Preisverläufe von Rohöl- (WTI), Diesel, Kerosin und Benzin am Golfküstenspotmarkt<sup>85</sup>

<sup>84</sup> vgl. <https://www.eia.gov/petroleum/data.php#prices> (gelesen am 16.12.2016)

<sup>85</sup> vgl. ebenda

Ein Vergleich der wöchentlich aktualisierten Spotmarktpreise für Kerosin wird von der IATA bereitgestellt. Wie in Abbildung 15 ersichtlich sind die globalen Preisunterschiede nur gering.

9 December 2016	Share in World Index	cts/gal	\$/bbl	\$/mt	Index Value 2000 =100	vs. 1 week ago	vs. 1 month ago	vs.1 yr ago
<b>Jet Fuel Price</b>	<b>100%</b>	<b>151.9</b>	<b>63.8</b>	<b>503.2</b>	<b>174.4</b>	<b>1.0%</b>	<b>13.0%</b>	<b>27.2%</b>
Asia & Oceania	22%	151.9	63.8	503.9	182.2	1.8%	14.3%	28.2%
Europe & CIS	28%	152.0	63.8	503.1	172.0	0.0%	12.9%	28.8%
Middle East & Africa	7%	148.0	62.1	490.6	185.7	0.8%	13.9%	31.2%
North America	39%	151.8	63.7	503.8	169.5	1.0%	12.2%	24.8%
Latin & Central America	4%	159.5	67.0	516.0	185.6	4.0%	12.6%	28.4%

Abbildung 15: Spotpreise für Jet A-1<sup>86</sup>

### Besteuerung

Innerhalb der EU:

Die Mindestsätze für die Energiebesteuerung innerhalb der Europäischen Union sind durch die Richtlinie 2003/96/EG des Rates der Europäischen Union festgelegt. In Deutschland wurden die Vorgaben durch das Energiesteuergesetz in nationales Recht umgesetzt. Kerosin und Flugbenzin unterliegen dem Energiesteuergesetz (EnergieStG). Einen Überblick über die Mindeststeuersätze in der EU und der Deutschen Steuersätze kann Tabelle 7 entnommen werden.

	Mindeststeuersätze in der EU (Richtlinie 2003/96/EG)	Deutsche Steuersätze (Energiesteuergesetz)
Verbleites Benzin	421,00 EUR je 1000 l	721,00 EUR je 1000 l
Unverbleites Benzin	359,00 EUR je 1000 l	654,50 EUR je 1000 l
Gasöl (inkl. Diesel)	330,00 EUR je 1000 l	470,40 EUR je 1000 l
Kerosin	330,00 EUR je 1000 l	654,50 EUR je 1000 l

Tabelle 6: EU Mindeststeuersätze und nationale Umsetzung<sup>87 88 89</sup>

<sup>86</sup> <https://www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/price-analysis.aspx> (gelesen am 13.12.2016)

<sup>87</sup> vgl. [www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Energie/Grundsaeetze-Besteuerung/Steuerhoehe/steuerhoehe\\_node.html](http://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Energie/Grundsaeetze-Besteuerung/Steuerhoehe/steuerhoehe_node.html) (gelesen am 13.12.2016)

<sup>88</sup> vgl. Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Energiesteuergesetz (2006), <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/energiestg/gesamt.pdf> (gelesen am 10.12.2016)

<sup>89</sup> vgl. Der Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2003/96/EG, S.63, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:283:0051:0070:DE:PDF> (gelesen am 13.12.2016)

Eine Steuerbefreiung für die gewerbliche Luftfahrt gilt nach Richtlinie 2003/96/EG Artikel 14 (1) b) für alle Kraftstoffe. Diese Steuerbefreiung kann allerdings von den Mitgliedstaaten auf Kerosin (KN 2710 19 21) beschränkt werden. Nach Artikel 14 (2) ist es Mitgliedstaaten erlaubt Kraftstoffe zum Zweck der Durchführung von nationalen Flügen von der Steuerbefreiung auszunehmen.

Durch bilaterale Verträge zwischen den Mitgliedsstaaten können zudem Kraftstoffe zum Zweck der Durchführung von Flügen zwischen diesen Staaten ebenfalls von der Steuerbefreiung ausgenommen werden. Bisher hat allerdings nur die Niederlande von diesem Recht Gebrauch gemacht und besteuert Kerosin für Inlandsflüge.<sup>90</sup>

Eine Steuerbefreiung gilt in Deutschland derzeit sowohl für die nationale als auch für die internationale gewerbliche Luftfahrt. Es gilt zu beachten, dass Firmen, die eigene Flugzeuge unterhalten, nicht steuerbefreit sind. Wird das Flugzeug allerdings von einer gewinnorientierten Tochtergesellschaft betrieben so ist eine Steuerbefreiung möglich, auch dann, wenn Transportdienstleistungen ausschließlich für die Muttergesellschaft erbracht werden.<sup>91</sup>

	Luftfahrt		
	Flüge zwischen der EU und Drittstaat	Flüge innerhalb der EU	Nationale Flüge
Verbleites Benzin (in EUR je 1000 l)	Besteuerung durch Mitgliedstaaten möglich		
Unverbleites Benzin (in EUR je 1000 l)			
Gasöl (inkl. Diesel) (in EUR je 1000 l)			
Kerosin (in EUR je 1000 l)	Beteuerung durch die Mitgliedstaaten nicht möglich	Besteuerung mit Hilfe von bilaterale Verträge möglich	Besteuerung durch Mitgliedstaaten möglich

**Tabelle 7: Rechtliche Möglichkeiten der EU-Mitgliedstaaten zur Besteuerung von Treibstoffen für die gewerbliche Luftfahrt<sup>92</sup>**

### Bruttomargen / Kleinabnehmer

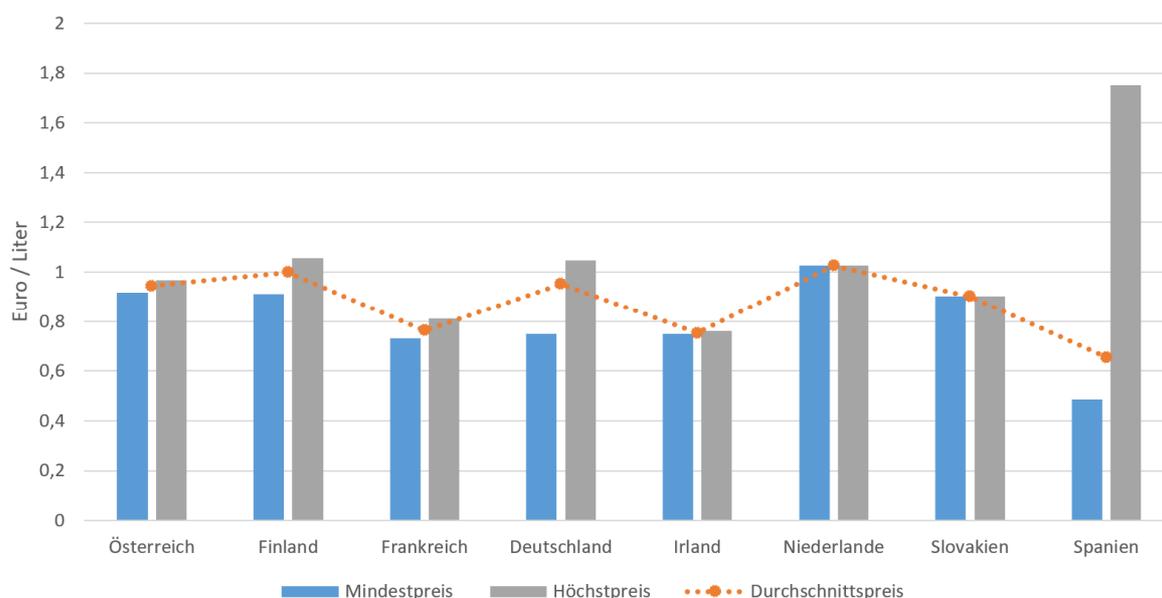
Grundsätzlich gilt es zwischen dem oben genannten Spotpreis und den Verkaufspreisen (an einem Flughafen) zu unterscheiden. Der Verkaufspreis inkludiert die Kosten des Transportes zum Flughafen, Steuern, Gebühren und Margen etc. Große Airlines verfügen, aufgrund der hohen Abnahmemengen (Lufthansa beziffert

<sup>90</sup> vgl. <https://www.vcd.org/themen/flugverkehr/kerosinsteuer/> (13.12.2016)

<sup>91</sup> vgl. <https://news.steuerfinder.com/betrieb/sonstigebetrieblichethemen/nachrichten/detail/artikel/keine-energiesteuer-auf-firmenflugzeuge-293.html> (20.01.2017)

<sup>92</sup> vgl. Der Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2003/96/EG, S.56ff, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:283:0051:0070:DE:PDF> (gelesen am 13.12.2016)

die Ausgaben für Treibstoffe im Geschäftsjahr 2015 mit 5,78 Mrd.Euro<sup>93</sup>), über eine erhebliche Verhandlungsmacht. Shell veröffentlicht in regelmäßigen Abständen eine Datenbank mit ihren aktuellen Preisen an verschiedenen Flughäfen. Für Kunden der Allgemeinen Luftfahrt kommt es zum Teil zu beträchtlich höheren Preisaufschlägen, die sich zudem sehr stark auf regionaler und nationaler Ebene unterscheiden. Abbildung 16 verdeutlicht den Preisunterschied von Jet A-1 innerhalb der Europäischen Union für Kleinabnehmer (alle Angaben ohne Steuern).



**Abbildung 16: Mindest-, Durchschnitts- und Höchstpreise für Jet A-1 für Kleinabnehmer<sup>94</sup>**

Aus den in Abbildung 15 angegebenen Spotmarktpreis von 63,8 US-Dollar je Barrel Kerosin in Europa, einem Wechselkurs von 1,057 Euro je Dollar<sup>95</sup> und den in Abbildung 16 ersichtlichen Durchschnittspreis für Kerosin in Deutschland von 0,95 Euro folgt eine Lieferantenmarge von 0,57 Euro je Liter (oder 60 Prozent des Verkaufspreises!). Im Kontrast dazu liegt die Bruttomarge der Mineralölbranche für Diesel bei einem wesentlich geringeren Wert von etwa 0,2 Euro je Liter.<sup>96</sup>

<sup>93</sup>vgl. Deutsche Lufthansa AG: Geschäftsbericht 2015, S.30, <https://investor-relations.lufthansagroup.com/fileadmin/downloads/de/finanzberichte/geschaeftsberichte/LH-GB-2015-d.pdf> (gelesen am 15.12.2016)

<sup>94</sup> vgl. <http://www.shell.com/business-customers/aviation/ppp/our-posted-airfield-prices.html> (gelesen am 09.02.2017)

<sup>95</sup> vgl. [https://www.ecb.europa.eu/stats/policy\\_and\\_exchange\\_rates/euro\\_reference\\_exchange\\_rates/html/index.en.html](https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/index.en.html) (Stand 10.12.2016)

<sup>96</sup> vgl. Bukold: Rekordpreise an den Tankstellen - Allein durch steigende Rohölpreise und schwachen Euro erklärbar? (07.30.2012), [https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag\\_de/themen\\_az/verkehr/PDF/benzinpreisstudie.pdf](https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/verkehr/PDF/benzinpreisstudie.pdf) (gelesen am 18.01.2017)

### 3 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen basiert auf mehreren Punkten:

1. Der Aufbau der Berechnung erfolgt schrittweise nach dem Prinzip der Kostenträgerstückrechnung
2. Mittels Concept-Map werden komplexe Relationen der Inputgrößen untereinander dargestellt
3. So weit wie möglich werden für die Kostenarten Kostenfunktionen definiert

#### 3.1 Kostenträgerstückrechnung

Die Kostenträgerstückrechnung (Kalkulation) dient der abrechnungsperiodenunabhängigen Ermittlung der durch einen Kostenträger verursachten Kosten. Sie beantwortet also die Frage: „Welche Kosten sind für die einzelnen Kostenträger entstanden?“.

Die Festlegung des Kostenträgers erfolgt anwendungsspezifisch. Maßgebend ist dabei das Informationsinteresse des Unternehmens. In der Praxis übliche Kostenträger sind meist:<sup>97</sup>

- Endprodukte und -produktgruppen
- Dienstleistungen
- Aufträge
- Kunden

Das Kernproblem der Kalkulation ist die Aufteilung der Periodenkosten auf die Kostenträger unter Berücksichtigung des Verursachungsprinzips.<sup>98</sup> In der Kosten- und Leistungsrechnung wird zwischen dem Divisionsverfahren und dem Zuschlagsverfahren unterschieden. Die Kostenzuordnung zu den Kostenträgern erfolgt bei der Vollkostenrechnung für die Einzelkosten direkt und für die Gemeinkosten indirekt über die Kostenstellen bzw. den Zuschlagssätzen.

Bei der Anwendung der Kostenträgerstückrechnung gilt es eine Reihe an Fragen zu beantworten:

1. Was genau soll modelliert werden, welche Lösung soll gefunden werden (irgendeine, die einzige, eine bestimmte)?
2. Welche Auflösung ist sinnvoll bzw. geboten?
3. Welche Größen spielen eine qualitative und welche eine quantitative Rolle?

---

<sup>97</sup> vgl. Deimel, Isemann und Müller (2006), S.206

<sup>98</sup> vgl. ebenda

4. Wo müssen diskrete Entitäten betrachtet werden und wo sind Durchschnittsgrößen zielführend?

Antwort auf das Bezugsobjekt der Modellierung und damit auf Frage 1 liefert Kapitel 5.1. In diesem Kapitel wird der Kostenträger spezifische Festlegung des Kostenträgers erläutert und begründet. Kapitel 5.3 geht auf Frage 2 ein und liefert somit Aufschluss über die berücksichtigten Faktoren und die Auflösung. Herzstück des Kostenmodells stellt schließlich Kapitel 5.4 dar, dieses Kapitel liefert Aufschluss über die Kostenallokation. In den nachfolgenden Kapiteln 5.5 bis 5.8 wird detailliert auf die berücksichtigten Kostenpositionen und damit auf die Fragen 3 und 4 eingegangen.

## 3.2 Concept-Map

Eine Concept-Map ist eine Möglichkeit zur systematischen Visualisierung von komplexen Sachverhalten in einer zweidimensionalen Struktur. Sie bietet Hilfestellung, um komplexe Zusammenhänge verständlich visualisieren zu können.

### Aufbaue einer Concept-Map

Eine Concept-Map besteht aus Propositionen (Bedeutungseinheiten) die sich aus einem Konzept (Begriff) und einer Relation (Verb, Adjektiv, Konjunktion) zusammensetzen. Begriffe werden in Form einer rechteckigen oder runden Box und Relationen in Form eines Pfeiles visualisiert. Die Charakteristika einer Concept-Map sind:<sup>99</sup>

- Hierarchischer Aufbau vom Allgemeinen zum Spezifischen von oben nach unten
- Unterstützt bei der Beantwortung einer Fokusfrage
- So genannte Cross-links können verschiedene Map-Regionen verbinden

Der wesentliche Vorteil von Concept-Maps liegt in der übersichtlichen Darstellung von komplexen Zusammenhängen. Concept-Maps sind aufgrund der Kennzeichnung von Relationen und der Möglichkeit Teilbereiche miteinander verbinden zu können genauer als Mind-Maps.<sup>100</sup>

### Anwendung in dieser Arbeit

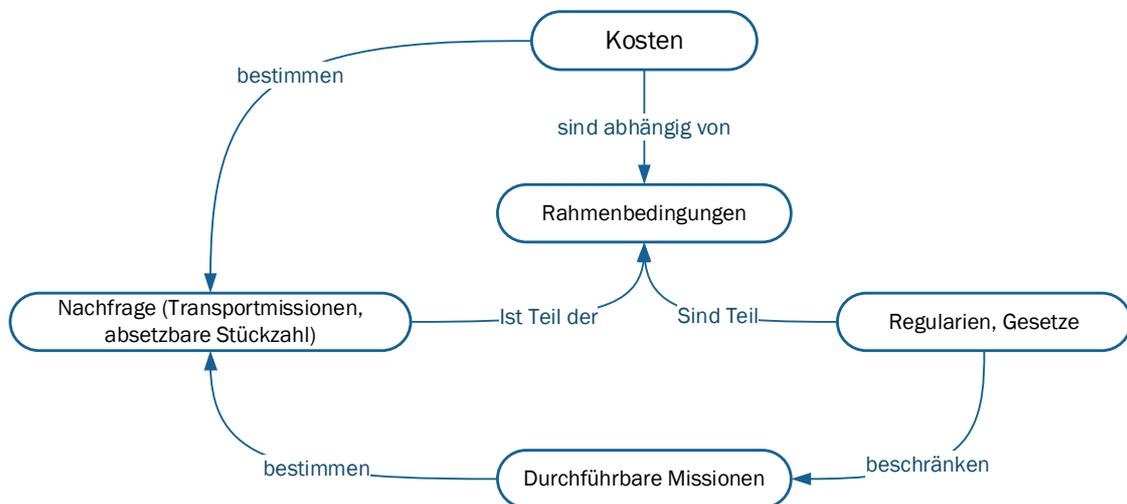
Die Methodik der Concept-Map eignet sich hervorragend, um die komplexe Fragestellung dieser Arbeit ausführlich darzulegen. Zentrale Frage dieser Arbeit sind die Kosten die bei der Durchführung einer Transportmission mit einem unbemannten Fluggerät in der definieren Nutzlastklasse von einer Tonne entstehen sowie deren Zusammenhang mit den Einflussfaktoren. Die Concept-Map wird in dieser Arbeit

---

<sup>99</sup> vgl. Novak und Cañas (2008), S.2f

<sup>100</sup> vgl. Fürstenau (2011), S.1

verwendet um, ausgehend von der Fragestellung, schrittweise eine Lösung zu erarbeiten und die dabei gewonnenen Erkenntnisse grafisch darzustellen. Dies geschieht sowohl hinsichtlich der zentralen Fragestellung (siehe Abbildung 17), als auch hinsichtlich Sub-Themen, wie für die qualitativen Faktoren der Kostenfunktionen (Abbildung 23 - Abbildung 27).



**Abbildung 17: Kernproblem dieser Arbeit<sup>101</sup>**

Wie in Abbildung 17 erkenntlich, ist sind die Kosten von den Rahmenbedingungen abhängig. Recht deutlich erkennbar ist allerdings auch die Rückkopplung der Kosten auf die Nachfrage, und damit auf einen ganz wesentlichen Teil der Rahmenbedingungen.

<sup>101</sup> Eigene Darstellung

## 4 Kostentheorie im Kontext der Luftfahrt

Kosten bilden die Grundlage für die Preisgestaltung. Sie haben direkten Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit eines Produktes bzw. einer Dienstleistung. Die Kostenrechnung stellt ein Instrument zur Gewinnung von Informationen zur Erreichung bzw. Erhaltung der Wirtschaftlichkeit dar.

### 4.1 Begriffsdefinition und Charakteristika

Der Begriff Kosten bildet gemeinsam mit dem Begriff Leistung ein zentrales Instrument zur Erfassung der Wertbewegung in Unternehmen. Kosten sind definiert als der auf dem betriebszweckbezogenen, bewerteten Güterverbrauch.<sup>102</sup> In dem Wort „betriebszweckbezogen“ liegt das zentrale Unterscheidungsmerkmal zu dem Begriffspaar Aufwand und Ertrag. Kosten weisen demnach ein „Mengengerüst“ und ein „Bewertungsgerüst“ auf. Es gilt zu beachten, dass der Mengenverbrauch nicht immer sofort als solcher erkennbar ist. Der Mengenverbrauch für die Kapitalnutzung kann beispielsweise in Form von Zinsen ausgedrückt werden.

Hinsichtlich der Bewertung unterscheiden Schweitzer und Küpper in zwei Gruppen:<sup>103</sup>

- Bewertungen basierend auf aktuellen oder zukünftigen Marktpreisen
- Bewertungen basierend auf Verrechnungspreisen

Kosten können unterschiedliche Eigenschaften beigemessen werden. Sie können in Bezug auf verschiedene Einflussgrößen fixe oder variable Charakteristika aufweisen. In der Kostenrechnung wird für gewöhnlich in diesem Zusammenhang nur eine Kosteneinflussgröße, die Beschäftigung (bzw. Leistungsmenge oder Ausbringung), in diesem Kontext betrachtet. Die Unterscheidung erfolgt also i.d.R. in (beschäftigungs-) fixe und (beschäftigungs-) variable Kosten. Üblicherweise wird in der Luftfahrt anstelle der Bezeichnung „Beschäftigung“ die Bezeichnung „Nutzung (des Fluggerätes)“ verwendet. Im industriellen Zusammenhang wird die Beschäftigung meist in Stück ausgedrückt. In der Luftfahrt werden meist Blockstunden als Maßstab für die Beschäftigung bzw. Nutzung verwendet, weitere gebräuchliche Maßeinheiten können aber auch Passagierkilometer und Tonnenkilometer sein.<sup>104</sup> Die fixen Kosten sind, aus kurzfristiger Sicht, beschäftigungsunabhängig. Sie können allerdings langfristig auf- bzw. abgebaut werden. Typische Fixkosten in der Luftfahrt sind Abschreibungen. Hinsichtlich der Verursachung der Kosten aus Sicht des Bezugsobjektes der Kostenrechnung wird in Einzel- und Gemeinkosten unterschieden. Einzelkosten sind

---

<sup>102</sup> Plinke, Rese und Utzig (2015), S.23

<sup>103</sup> vgl. Schweitzer und Küpper (2011), S.16

<sup>104</sup> vgl. Holloway (2008), S.279

dem Bezugsobjekt unmittelbar zurechenbar. Gemeinkosten sind nicht unmittelbar zurechenbar, da sie für mehr als eine Leistungseinheit gemeinsam anfallen.

## 4.2 Kostenrechnungssysteme

Die Kostenrechnung stellt eine Gesamtheit von Methoden und Systemen zur Erfassung, Aufbereitung und Weiterleitung der im Produktionsprozess entstehenden Kosten dar.<sup>105</sup> Die Kostenrechnung beantwortet dabei in ihren Teilbereichen folgende Fragen:<sup>106</sup>

- Kostenartenrechnung: Welche Kosten sind entstanden?
- Kostenstellenrechnung: Wo sind die Kosten entstanden?
- Kostenträgerrechnung: Warum sind die Kosten entstanden?

Die Kostenartenrechnung dient der Erfassung und Gliederung der Kosten. Die Gliederung ist abhängig vom Rechnungszweck. In der Luftfahrt werden die Kostenarten meist in funktionaler Form gegliedert. Die Gliederung der Kostenstellen ist ebenfalls vom Rechnungszweck abhängig. Kapitel 4.1 hat offenbart, dass Kosten verschiedene Eigenschaften innehaben. Bei der Kostenzurechnung ergeben sich daraus Problemstellungen, die es zu bewältigen gilt.

Plinke definiert das Kostenüberwälzungsprinzip als oberstes Prinzip der Kostenzurechnung, es besagt, dass alle Kosten einer betrachteten Periode vollständig auf die Leistungseinheiten verrechnet werden müssen. Als untergeordnetes Prinzip fungiert das Verursachungsprinzip, demnach Kosten den Bezugsobjekten zugeordnet werden müssen, die sie verursacht haben. Eindeutig möglich ist dies allerdings nur bei den Einzelkosten.<sup>107</sup>

## 4.3 Plan- bzw. Prognoseorientierte Kostenrechnung

Im Gegensatz zur IST-Kostenrechnung erfasst und verteilt die Plankostenrechnung nicht realisierte Kosten, sondern berechnet nach bestimmten Verfahren bereits vor Beginn der Planungsperiode Kosten, die in dieser erwartet werden. Sie besteht aus vier Komponenten:<sup>108</sup>

- Vorrechnung
- Nachrechnung
- Ermittlung von Abweichungen
- Abweichungsanalyse.

---

<sup>105</sup> vgl. Steger (2006), S.71

<sup>106</sup> vgl. Hering (2015), S.3

<sup>107</sup> vgl. Plinke, Rese und Utzig (2015), S.48

<sup>108</sup> vgl. Schweitzer und Küpper (2011), S.270

Kostenprognosen sind immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Kostenhypothesen bilden die wichtigste Grundlage für die Prognose, sie geben die Beziehung der Kosten und ihren Bestimmungsgrößen (Kosteneinflussgrößen) wieder. Die gesetzmäßige Abbildung dieses Zusammenhanges wird Kostenfunktion genannt. Zentrales Problem der Kostenprognose ist die raum-zeitlich begrenzte bzw. in vielen Fällen gänzlich fehlenden Kenntnisse der Kostenfunktion. Schweitzer und Küpper verweist in diesen Fällen auf Mengen- und Preisschätzungen.<sup>109</sup>

#### 4.4 Kostenmodelle für unbemannte Luftfahrzeuge

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln auf Kostentheorie im Allgemeine eingegangen wurde, liegt in diesem Kapitel der Fokus auf den aktuellen Stand der Wissenschaft in Bezug auf Kostenmodelle für unbemannte Luftfahrzeuge für den Transporteinsatz. Für die Recherche folgt einem systematischen Vorgehen. Dazu wurden Publikation & Literatur im Zeitraum von 1995 bis 2018 auf folgenden drei Online-Datenbanken durchsucht:

- Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>)<sup>110</sup>
- Google Scholar (<https://scholar.google.at/>)<sup>111</sup>
- Universitätsbibliothek der technischen Universität Hamburg (<https://katalog.tub.tuhh.de/>)

Die Universitätsbibliothek der technischen Universität Hamburg wurde aufgrund des Luftfahrt Forschungsschwerpunktes der Hochschule herangezogen.

Primäres Ziel war die Erhebung des Stands der Technik von Kostenmodellen für unbemannte Fluggeräte mit einer Nutzlast von etwa einer Tonne. Folgende Suchbegriffkombinationen wurden für die Suche verwendet:

- UAV, cost, model
- UAV, cost, estimation
- UAV, operating, costs
- Drone, cost, model
- Drone, cost, estimation
- Unbemanntes, Luftfahrzeug, Kostenmodell

Anschließend wurde das Ergebnis gemäß folgenden Kriterien gefilterte:

1. Handelt es sich tatsächlich um ein Kostenmodell bzw. eine Kostenabschätzung?

---

<sup>109</sup> vgl. Schweitzer und Küpper (2011), S.272ff

<sup>110</sup> Keyword - Suche

<sup>111</sup> Allintitle - Suche

2. Lässt sich das Kostenmodell auf eine unbemannte Transportlösung mit einer Nutzlast von einer Tonne anwenden?

Die Suche erzielte in Summe 239 Treffer. Eine Übersicht der Verteilung kann Abbildung 18 entnommen werden. Die Anwendung des ersten Filterkriteriums reduziert die Anzahl der Treffer allerdings bereits auf nur noch fünf Treffer, wie Abbildung 19 entnommen werden kann.

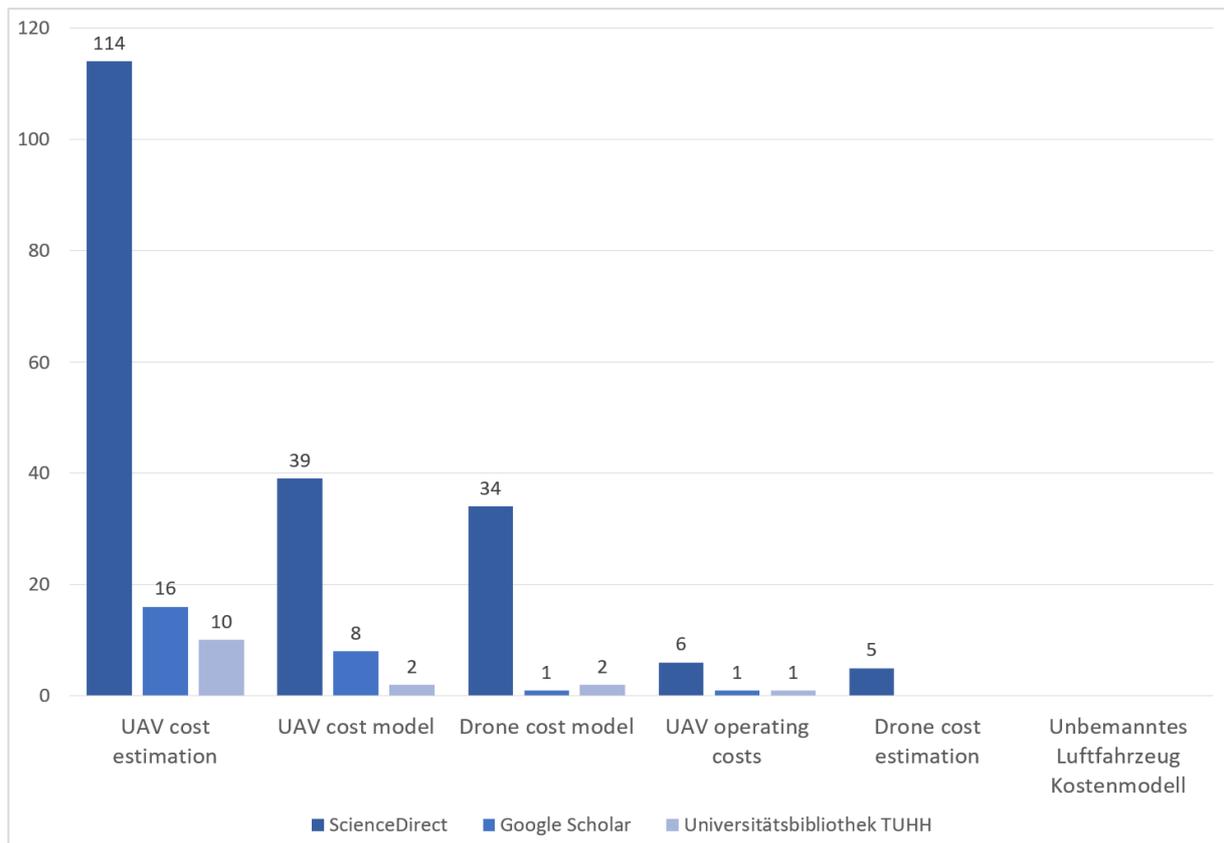


Abbildung 18: Anzahl der Treffer<sup>112</sup>

<sup>112</sup> Eigene Darstellung

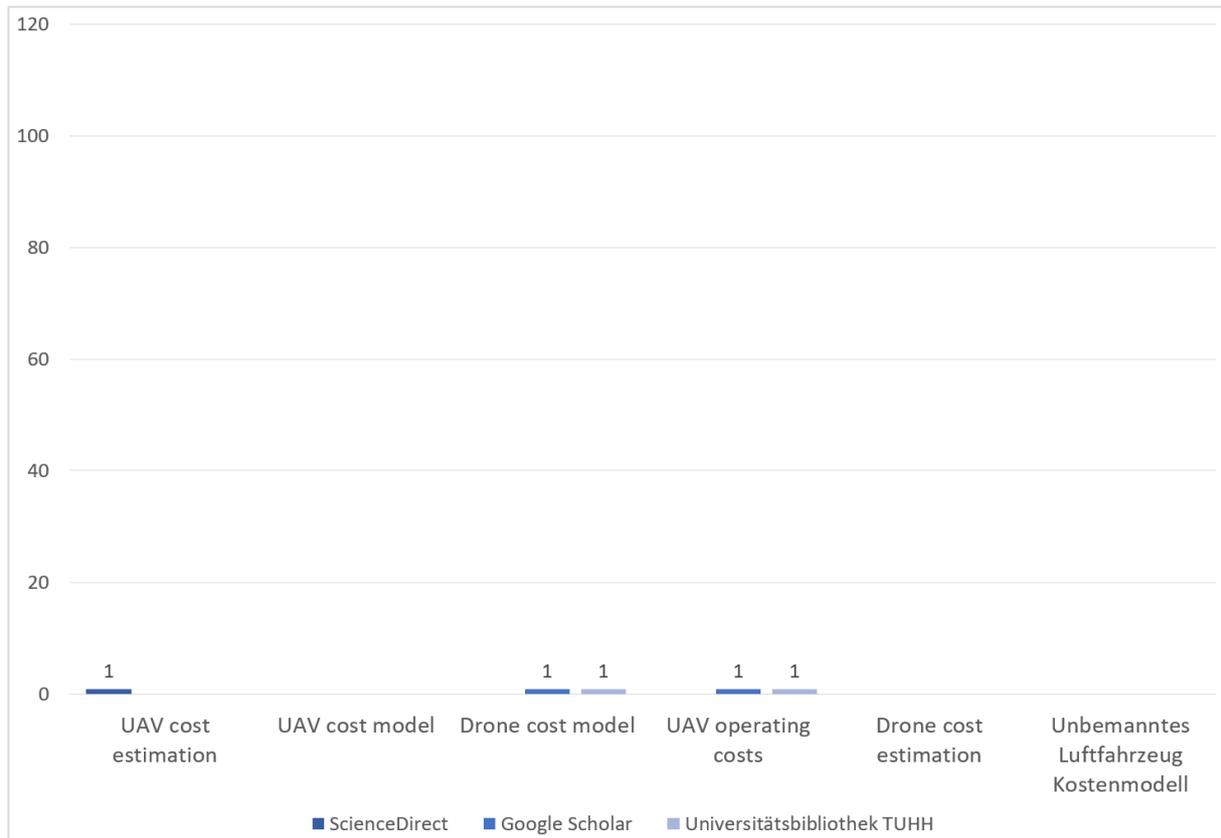


Abbildung 19: Anzahl der Treffer (gefiltert nach 1. Kriterium)<sup>113</sup>

Nach Anwendung des zweiten Filterkriteriums konnten keine Publikationen gefunden werden.

## 4.5 Luftfahrtspezifische Kostenmodelle

Nachdem die Suche von Publikation in Bezug auf Kostenmodellen für ein unbemanntes Luftfahrzeug im Nutzlastbereich von einer Tonne keine relevanten Publikationen gefunden werden konnten wurde die Recherche erweitert. Ziel dieser erweiterten Recherche stellt die Identifikation von Kostenmodelle aus angrenzenden Fachbereichen dar. Angrenzende Fachbereiche beinhalten insbesondere die Kostenrechnung von Airlines. Sowie die Kostenabschätzung von bemannten Fluggeräten im Nutzlastbereich von ca. einer Tonne. Diese Zusammenhänge werden in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer betrachtet.

### 4.5.1 Total Operating Costs (TOC) - Modelle

Bei der Betriebskostenbetrachtung wird in der Luftfahrt üblicherweise in operative und nicht-operative Kosten unterschieden, erstere werden auch „Total Operating Costs“ (TOC) bezeichnet. Die TOC gliedern sich wiederum in indirekte operative Kosten (IOC) und in direkte operative Kosten (DOC). Auf der untersten Gliederungsebene

<sup>113</sup> Eigene Darstellung

kann weiter in (beschäftigungs-) fixe und (beschäftigungs-) variable Bestandteile unterschieden werden. Ein Luftfahrzeug beeinflusst i.d.R. nur die DOCs eines Lufttransportunternehmens. Die DOCs können für verschiedene Bezugsobjekte betrachtet werden. Es ist sowohl eine periodenbezogene systemweite Betrachtung als auch eine fluggerätebezogene Betrachtung möglich. Die Zurechenbarkeit der Kostenpositionen ist dabei abhängig von der Wahl des Bezugsobjektes. Das DOC-Konzept gibt i.A. keinen Aufschluss über die Festlegung der Kostenstellen und Kostenträger.<sup>114</sup>

Einen Überblick der im obigen Absatz genannten Zusammenhänge liefert Die operativen Kosten sind Teil der Betrachtungen dieser Arbeit. Die nicht-operativen Kosten stehen nicht in direktem Zusammenhang mit dem Lufttransport und sind daher für diese Arbeit nicht von Relevanz.

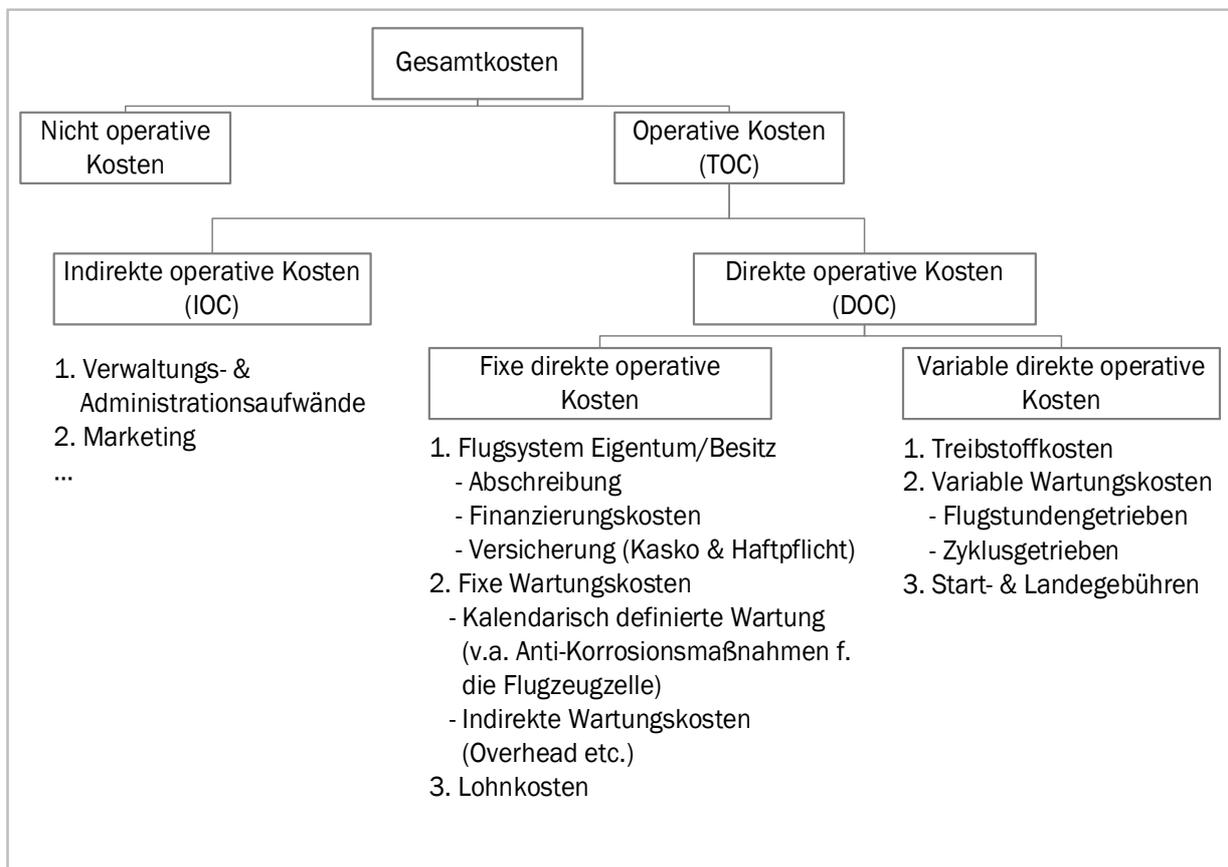


Abbildung 20: Gebräuchliche Kostenklassifizierung in der Luftfahrt<sup>115</sup>

#### 4.5.2 Kostenmodellierung nach Conklin und de Decker

Conklin & De Decker Aviation bietet mit dem Aircraft Cost Evaluator eine kommerziell erwerbliche Datenbank mit detaillierten Abschätzungen der Betriebskosten von über 500 Fluggeräten der Allgemeinen Luftfahrt.<sup>116</sup> Obwohl die

<sup>114</sup> vgl. Holloway (2008), S.274ff

<sup>115</sup> vgl. Holloway (2008), S.274

<sup>116</sup> vgl. <https://www.conklindd.com/products/> (gelesen am 26.01.2019)

Kostenmodellierungsmethodik nicht vollständig zugänglich ist, besteht aufgrund der umfangreichen Beschreibung der Rahmenbedingungen und der quantitativen Beschreibung der auftretenden Kostenpositionen für Fluggeräte der Allgemeinen Luftfahrt hohe Relevanz für diese Arbeit. Der folgende Abschnitt basiert auf Darstellungen aus der Conklin & de Decker Aircraft Cost Summary 2012.<sup>117</sup> Im ersten Teil dieses Kapitels wird auf die Kostenmodellierung von Conklin & de Decker im Allgemeinen eingegangen. Im zweiten Abschnitt werden die Kostenpositionen anhand einer Cessna 208 quantitativ dargelegt. Der letzte Abschnitt widmet sich der Diskussion der Vor- und Nachteile dieser Art der Kostenmodellierung.

Als Bezugsobjekt der Kostenabschätzung dient eine fixe jährliche Nutzung (ausgedrückt durch die zurückgelegte Gesamtstrecke), die sich kumulativ aus Einzelflügen mit einer fixen, flugzeugtypischen Fluggeschwindigkeit und fixer Flugstreckenlänge bildet. Die Kostenmodellierung ist also hinsichtlich der Länge der Einzelflüge, der Geschwindigkeit und der jährlichen Nutzung statisch. Die Annahme der jährlichen Nutzung und der Flugstreckenlänge sind abhängig von der Antriebstechnologie. Kolben-getriebene Flugzeuge wird eine jährliche Nutzung von 45.000 nautischen Meilen (1 nautische Meile = 1,85 Kilometer) und eine Flugstreckenlänge von 200 nautischen Meilen zugrunde gelegt. Für Turboprop-getriebene Flugzeuge liegt die angenommene jährliche Flugleistung mit 115.000 nautischen Meilen und die angenommene Flugstrecke von 300 nautischen Meilen deutlich höher. Die jährliche Nutzung ausgedrückt in Flugstunden ergibt sich als Funktion dieser Parameter. Aus geografischer Sicht beziehen sich die Angaben auf die USA. Die Kostengliederung erfolgt in (flugstunden-) variable Kosten und jährliche Fixkosten.

Die variablen Kostenpositionen umfassen unter anderem die Treibstoffkosten, Wartungskosten, Start- und Landegebühren sowie variable (Lohn-) Kosten der Flugzeugbesatzung. Die Treibstoffkosten bilden sich aus dem Treibstoffverbrauch und den Treibstoffpreisen. Die angenommenen Treibstoffpreise basieren auf einer Befragung einer Reihe von Fixed Base Operators (FBOs) an den wichtigsten Flughäfen der Allgemeinen Luftfahrt in den USA. Der Treibstoffverbrauch basiert auf Herstellerangaben im Handbuch des jeweiligen Fluggerätes und wird für die flugzeugtypische Reisegeschwindigkeit und die Flugstreckenlänge unter Berücksichtigung der einzelnen Flugphasen berechnet. Die berücksichtigten Flugphasen umfassen Taxi-, Steigflug-, Reiseflug-, Sinkflug- und Landephase. Zur Berücksichtigung von externen Faktoren wie die Fähigkeiten des Piloten, ATM Restriktionen, Verspätungen etc. ist ein Aufschlag von 15 Prozent auf den Treibstoffverbrauch vorgesehen. Für kolbengetriebene Flugzeuge und Helikopter wird

---

<sup>117</sup> Conklin & de Decker Aviation Information: Aircraft Cost Summary (2012), <http://questaircraft.com/wp-content/uploads/2012/04/ConklinCostSummary.pdf> (gelesen am 18.01.2017)

zusätzlich der Ölverbrauch einbezogen. Die Wartungskosten werden in Wartungsarbeitskosten, Teilekosten und die Kosten der Triebwerksüberholung unterteilt. Die Wartungsarbeitskosten beinhalten alle Routineinspektionen, alle zustandsabhängigen Wartungsarbeiten an der Flugzeugzelle sowie Avionik. Sie werden basierend auf einer Schätzung der benötigten Wartungsstunden pro Flugstunde und einem Kostensatz pro Wartungsstunde berechnet. Die Teilekosten decken die Ersatzteile für die Flugzeugzelle und Avionik ab. Die Kosten der Triebwerksüberholung basieren auf den Kosten eines Wartungsvertrages mit der Jet Support Service, Inc auf „Fly-by-hour“ Basis oder, wenn dieser nicht Verfügbar ist, auf einer Abschätzung basierend auf dem Triebwerkswartungsplan. Die Start- und Landegebühren spiegeln einen durchschnittlichen Wert für die USA wieder und sind modelliert als Funktion in Abhängigkeit zum MTOW. Die fixen Kostenpositionen umfassen u.a. Abschreibung, Lohnkosten der Flugzeugbesatzung, Kosten für den Hangar, Versicherung, Training, Modernisierung und Überholung.

Folgend wird die funktionale Betriebskostenstruktur der Allgemeinen Luftfahrt beispielhaft an Hand eines konkreten Flugzeuges quantifiziert. Die angeführten Details beziehen sich auf die von Conklin & de Decker in der Kostenaufstellung für die Cessna 208 gemachten Angaben aus dem Jahr 2012.<sup>118</sup>

Die Cessna 208 ist ein einmotoriges Turboprop-Flugzeug in Passagier- oder Frachtausführung mit einem MTOW von ca. 3.630 Kilogramm. Die Leistungsdaten sind durch eine maximale Nutzlast von ca. 1.400 Kilogramm und eine Maximalgeschwindigkeit von ca. 340 Kilometer pro Stunde spezifiziert. Der Neupreis beläuft sich auf etwa 2.000.000 Dollar.<sup>119</sup>

Die Relevanz dieses Flugzeugmodells für diese Arbeit begründet sich mit dem Nutzlastbereich und der Anwendung in hohen Stückzahlen für den Expressfrachttransport in den USA.<sup>120</sup> Die Kostenstruktur ist geprägt von einer Vielzahl externer und interner Kostentreiber und Rahmenbedingungen, die absoluten Werte und die prozentuellen Anteile der Kostenpositionen an den Gesamtkosten müssen daher immer im Kontext zu den Rahmenbedingungen betrachtet werden. Basierend auf der flugzeugspezifischen Fluggeschwindigkeit werden 734 Flugstunden für die Absolvierung von 115.000 nautischen Meilen benötigt. Abbildung 21 zeigt die prozentuellen Anteile der funktionalen Kostenpositionen an den jährlichen (fixen und variablen) Gesamtkosten. Mehr als 80 Prozent der jährlichen Gesamtkosten sind demnach auf die Treibstoffkosten, Abschreibung, Lohnkosten und Wartungskosten

---

<sup>118</sup> vgl. Conklin & de Decker Aviation Information: Aircraft Cost Summary (2012), S.6ff, <http://questaircraft.com/wp-content/uploads/2012/04/ConklinCostSummary.pdf> (gelesen am 18.01.2017)

<sup>119</sup> vgl. <http://cessna.txtav.com/en/turboprop/caravan> (24.01.2017)

<sup>120</sup> vgl. Kapitel 2.3

zurückzuführen. Die Versicherungskosten (Kasko und Haftpflicht) stellen mit nur 2 Prozent einen sehr kleinen Anteil an den Gesamtkosten.

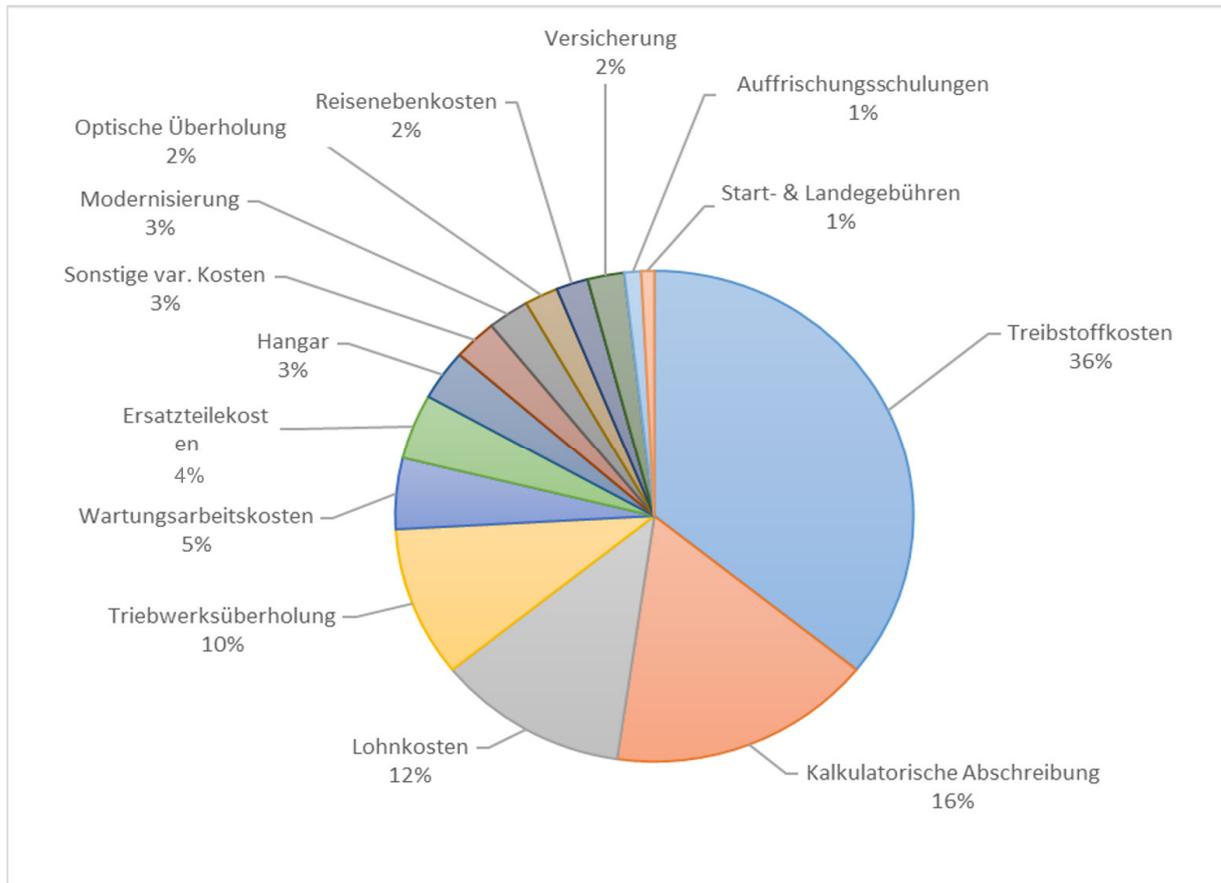


Abbildung 21: Funktionale Betriebskostenstruktur Cessna 208 nach Conklin und de Decker<sup>121</sup>

<sup>121</sup> vgl. Conklin & de Decker Aviation Information: Aircraft Cost Summary (2012), S.1ff, <http://questaircraft.com/wp-content/uploads/2012/04/ConklinCostSummary.pdf> (gelesen am 18.01.2017)

Bezeichnung	(stundenbezogene) var. Kosten	Jährliche Fixkosten	Jährliche Gesamtkosten
Treibstoffkosten	377 USD		276.535 USD
Kalkulatorische Abschreibung		127.938 USD	127.938 USD
Lohnkosten		92.300 USD	92.300 USD
Triebwerksüberholung	104 USD		76.571 USD
Wartungsarbeitskosten	50 USD		36.333 USD
Ersatzteilekosten	45 USD		33.258 USD
Hangar		25.700 USD	25.700 USD
Sonstige var. Kosten	29 USD		21.058 USD
Modernisierung		20.000 USD	20.000 USD
Optische Überholung		16.200 USD	16.200 USD
Reisenebenkosten	21 USD		15.392 USD
Versicherung		17.735 USD	17.735 USD
Auffrischungsschulungen		8.100 USD	8.100 USD
Start- und Landegebühren	9 USD		6.268 USD
Sonstige Fixkosten		4.446 USD	4.446 USD
<b>Gesamt</b>	<b>634 USD</b>	<b>312.419 USD</b>	<b>777.834 USD</b>

**Tabelle 8: Funktionale Betriebskostenstruktur einer Cessna 208 nach Conklin und de Decker<sup>122</sup>**

Die Stärken der Conklin und de Decker Kostenschätzung liegt in der Vergleichbarkeit einer großen Anzahl von Fluggeräten für die angegebene jährliche Nutzung. Aus wissenschaftlicher Sicht ist allerdings die mangelnde Transparenz der Modellierungsmethodik zu bemängeln. Eine Vielzahl der Abschätzungen ist nicht vollständig transparent. Eine Vergleichbarkeit von Turboprop-Flugzeugen und kolbengetriebenen Flugzeugen ist aufgrund der unterschiedlichen Bezugsbasis hinsichtlich der jährlichen Nutzungen nicht gegeben. Bei starker Abweichung der tatsächlichen jährlichen Nutzung ist die Kostenabschätzung nur beschränkt aussagekräftig.

### 4.5.3 Aviation Cost Model (ACOS)

Das Aviation Cost Modell (ACOS) des NLR (Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium bzw. Nationales Luft- und Raumfahrtlabor der Niederlande) ist eine Methodik zur Kostenmodellierung der operativen Kosten eines generischen Flugzeugtypen, bezogen auf einen Trip. Es umfasst die Kostenpositionen Besatzung, Wartung, Treibstoff, Flughafengebühren und Flugsicherungsgebühren sowie Abschreibungen und Finanzierungskosten. Die Kostenstruktur basiert auf einem

<sup>122</sup> vgl. Conklin & de Decker Aviation Information: Aircraft Cost Summary (2012), S.1ff, <http://questaircraft.com/wp-content/uploads/2012/04/ConklinCostSummary.pdf> (gelesen am 18.01.2017)

Mengen- und einem Preisgerüst. Das Mengengerüst bezieht sich auf den generischen Flugzeugtypen und das so genannte Technologiellevel. Das Technologiellevel berücksichtigt Unterschiede zwischen „neuen“ und „alten“ Flugzeugen. Das Mengengerüst bezieht sich dabei zwangsläufig nicht immer direkt auf den Flug (Zyklus) sondern ggf. auf die Distanz oder auf die Blockstunden.<sup>123</sup>

Das ACOS Modell ist das einzige bekannte Kostenmodell für die Luftfahrt, dass sich auf einen einzelnen Trip bezieht. Eine Übersicht der betrachteten Kostenpositionen und Ihrer Bezugsgröße kann Tabelle 9 entnommen werden.

Kostenposition	Bezugsgröße		
	Flug (Cycle)	Distanz	Blockstunden
Blockzeit	x	x	
Treibstoff	x	x	
Wartung			x
Besatzung			x
Start- und Landengebühren	x		
Flugsicherungsentgelte (en-route)		x	
Abschreibung			x
Finanzierungskosten			x

**Tabelle 9: Kostenpositionen und Bezugsgrößen des ACOS<sup>124</sup>**

#### 4.5.4 DAPCA-IV nach Gudmundsson

DAPCA (Development and Procurement Cost of Aircraft) ist ein Modell für die Abschätzung der Entwicklungs- und Produktionskosten für Flugzeughauptbaugruppen und wurde ab 1967 von der Rand Corporation für die US Air Force entwickelt.<sup>125</sup> Die letzte Version wurde 1987 veröffentlicht und ist unter der Bezeichnung DAPCA-IV bekannt.<sup>126</sup>

Das Modell verwendet ein Set von 27 Inputparameter, aus dem je nach Anwendungsfall ca. 12 bis 15 Parameter für eine Berechnung nötig sind. Beispiele für Parameter sind: Antriebsleistung, Geschwindigkeit und Triebwerksart. Die zugrundeliegenden Formeln werden als „Cost Estimation Relations“ (CERs) bezeichnet und basieren auf Datensätzen vorrangiger militärischer Luftfahrtprogramme. Die Datensätze umfassen Daten von Kampflugzeuge, Trainern,

<sup>123</sup> vgl. Vlek und Vogels (2000), S.45ff

<sup>124</sup> vgl. ebenda, S.46

<sup>125</sup> vgl. Boren, H. E. (1967).

<sup>126</sup> vgl. Hess und Romanoff (1987).

Transporter und Bomber in konventioneller Bauweise (nicht aus Stahl oder Verbundwerkstoffe).<sup>127</sup>

Erste Versuche das Modell für zivile Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt anzuwenden erwiesen sich als nicht zielführend. Die Kosten für eine Cessna 172 wurden beispielsweise um etwa 200 Prozent überschätzt. Eastlake begründet dies damit, dass militärische Flugzeuge aller Größenordnungen i.d.R. erheblich höhere Kosten in der Entwicklung und Produktion verursachen als ihre zivilen Pendanten. Durch gezielte Anpassung der Parameter und anschließender Validierung Anhand der Cessna 172 konnte Eastlake im Jahr 2000 erstmals genaue Kostenabschätzungen für Fluggeräte der Allgemeinen Luftfahrt erreichen.<sup>128</sup>

Gudmundsson hat Eastlakes Erkenntnisse aufgegriffen und 2012 ein darauf basierendes, aktualisiertes und erweitertes Modell veröffentlicht. Problematisch in Bezug auf das Modell von Eastlake ist die Validierung anhand nur eines Flugzeuges, der Cessna 172. Ob diese Problematik bei der Weiterentwicklung des Modells durch Gudmundsson behoben wurde geht aus diesem nicht eindeutig hervor. Die Anwendbarkeit ist gemäß der Modellbeschreibung jedoch sowohl für Fluggeräte mit LSA- als auch 14 PART 23- Zertifizierung gegeben.

---

<sup>127</sup> vgl. Raymer (2006), S.570

<sup>128</sup> vgl. Eastlake und Blackwell (2000).

## 5 Konzeption der Kostenabschätzung

Die Diskussion der vorangegangenen Kapitel hat offenbart, dass die bestehenden Kostenmodellierungen entweder nicht über die nötige Detailtiefe verfügen, starr hinsichtlich geänderter Betriebsparameter sind und/oder nur Teile der zu erwartenden Kostenstruktur abdecken. Insbesondere befassen sich die meisten Kostenmodelle mit der Erfassung und der Kostenallokation eines bestehenden Flugbetriebes (IST-Kostenrechnung), nicht aber mit der Prognose zukünftiger Kosten.

Basierend auf den Prinzipien der Kostenträgerstückrechnung wurde daher ein bottom-up Modell entwickelt, das sich zur Beantwortung der in der Zielstellung dieser Arbeit definierten Fragestellungen eignet. Es vereint dazu verschiedene Komponenten der in Kapitel 4 angeführten Kostenmodelle:

- Der Modellumfang umfasst die in den DOC Modellen definierte Gruppe der direkten operativen Kosten.
- Das Bezugsobjekt der Kostenmodellierung ist wie im ACOS Model die Transportmission.
- Der Umfang und die Gliederung der berücksichtigten Kostenarten nimmt Bezug auf die Kostenmodellierung von Conklin und de Decker.
- Das DAPCA-IV Modell nach Gudmundsson wird in einer modifizierten Form zur Abschätzung der Entwicklungs- und Produktionskosten<sup>129</sup> des unbemannten Fluggerätes verwendet.

Die Eigenschaften der Kostenmodellierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Kostengliederung in funktionaler Form
- Sachbezug der Kostenrechnung: Vollkostenrechnung
- Kalkulationsverfahren: Zuschlagskalkulation
- Blockstunden sind die zentrale Bezugsgröße für die Kostenallokation

---

<sup>129</sup> Die Abschätzung der Entwicklungs- & Produktionskosten des unbemannten Fluggerätes ist nicht primär das Ziel dieser Arbeit, wird aber für die Abschätzung der Abschreibung benötigt.

## 5.1 Bezugsobjekt: Transportmission

Die Festlegung des Bezugsobjektes ist zentraler Ausgangspunkt der Kostenträgerstückrechnung. Grundsätzlich gibt es bei der Festlegung des Bezugsobjektes kein richtig oder falsch, die Festlegung kann allerdings zweckmäßig oder unzweckmäßig sein. Mögliche Betrachtungsformen sind:

- Die tripbasierte Betrachtungsweise („Transportpreis von A nach B“)
- Die Betrachtung auf Zeitbasis („Stundenpreis“)
- Die Betrachtung auf Basis der Strecke („Kilometerpreis“)

In der vorliegenden Kostenmodellierung erfolgt die Betrachtung tripbasiert, als Bezugsobjekt fungiert die Transportmission. Dadurch soll das dem Kunden angebotene „Produkt“, der Warentransport von A nach B, in den Fokus gerückt werden. Im Gegensatz zur periodischen Betrachtung hat diese den Vorteil, dass damit ein „on-demand“ Betrieb des Fluggerätes für mehrere Kunden abbildbar ist. Bei der Betrachtung auf Zeitbasis oder Basis der Strecke kann die Berücksichtigung von tripbezogene Einzelkosten wie Start- und Landegebühren nicht verursachungsgerecht erfolgen.

Die Transportmissionen unterscheiden sich untereinander i.A. hinsichtlich der zurückgelegten Strecke, der Fluggeschwindigkeit und der Nutzlast. Abbildung 22 zeigt beispielhaft den Ablauf einer Transportmission.

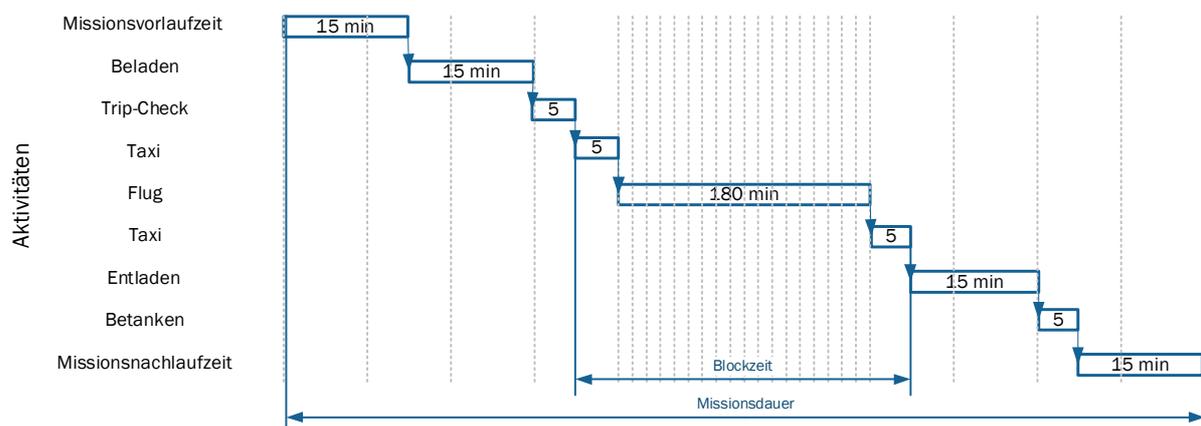


Abbildung 22: Beispielhafter Ablauf einer Transportmission<sup>130</sup>

Nachfolgend werden die wichtigsten Begrifflichkeiten und Rahmenbedingungen in Bezug auf die Transportmission definiert bzw. beschrieben:

<sup>130</sup> Eigene Darstellung

## **Fluggeschwindigkeit und Winde**

Die Fluggeschwindigkeit wird über die Flugzeit konstant angenommen. Windeinflüsse werden nicht berücksichtigt, Airspeed und Groundspeed sind demnach während des gesamten Fluges gleich groß.

## **Steig- und Sinkfluges**

Der Steig- und Sinkflug stellt aufgrund der geringen Flughöhe von nur 150 Meter eine untergeordnete Rolle dar. Bei üblichen Steigraten von >5 Meter pro Sekunde nehmen diese beiden Flugphasen insgesamt weniger als eine Minute in Anspruch. Demnach beträgt der zeitliche Anteil dieser Flugphasen an der gesamten Flugdauer üblicherweise weniger als ein Prozent, sie werden daher vernachlässigt.

## **Umwegfaktor**

Der für diese Modellierung eingeführte „Umwegfaktor“ ist der Quotient der tatsächlichen Flugstrecke und der Luftlinie zwischen Start- und Zielpunkt. Mit diesem Faktor wird der aus dem Konzept der Risikominimierung resultierende Umweg beschrieben.<sup>131</sup> Er ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, diese umfassen unter anderem die Bevölkerungsdichte der überflogenen Gebiete und die Topografie.

## **Missionsdauer**

Die Missionsdauer umfasst die gesamte nötige Zeit für die Durchführung einer Transportmission und anschließender Wiederherstellung der Bereitschaft zur Durchführung der nächsten Transportmission. Sie umfasst demnach die nötige Zeit zum Betanken, zur Durchführung des Tripchecks sowie zur Be- und Entladung des Fluggerätes. Sie ist damit größer als die Blockzeit.

Abbildung 23 zeigt die wichtigsten Zusammenhänge der Transportmission in Form einer Concept-Map. Die grau hinterlegten Felder beinhalten Inputgrößen, aus denen die Blockzeit und die Flugdistanz errechnet werden können.

Die Mission wird grundlegend mit Flugdistanz (Formel 1) und Blockzeit (Formel 2) beschrieben.

---

<sup>131</sup> vgl. Kapitel 2.2.3 & 2.2.4

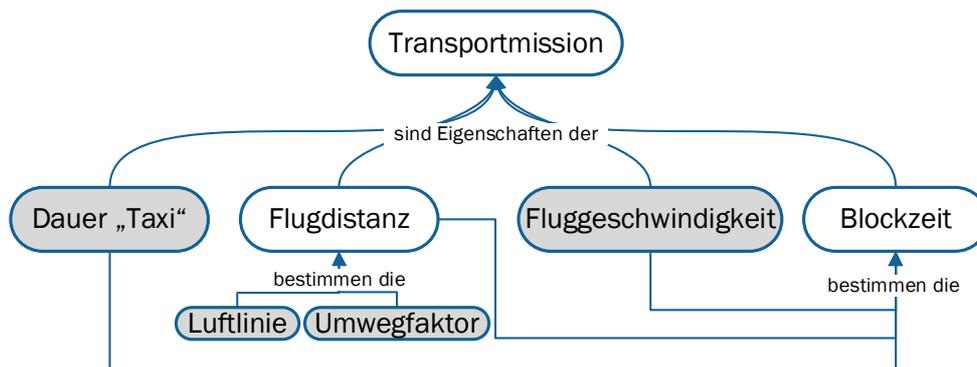


Abbildung 23: Zusammenhänge der Transportmission<sup>132</sup>

$$\text{Flugdistanz} = \text{Luftlinie} * \text{Umfwegfaktor}$$

Formel 1: Flugdistanz einer Transportmission<sup>133</sup>

$$\text{Blockzeit} = \frac{\text{Flugdistanz}}{\text{Fluggeschwindigkeit}} + \text{Taxi}$$

Formel 2: Blockzeit einer Transportmission<sup>134</sup>

<sup>132</sup> Eigene Darstellung

<sup>133</sup> Definition durch den Autor im Sinne der Aufgabenstellung

<sup>134</sup> Definition durch den Autor im Sinne der Aufgabenstellung

## 5.2 Jährliche Nutzung des Fluggerätes

Die jährliche Nutzung des Fluggerätes ergibt sich kumulativ aus den Missionen. Ein Ersatzmaßstab zur Quantifizierung der jährlichen Nutzung stellt die Addition der (i.A. voneinander unterschiedlichen) Blockzeiten der einzelnen Missionen dar. Weitere Möglichkeiten zur Quantifizierung sind die kumulierte jährliche Flugstrecke bzw. die Summe der Starts und Landungen (Zyklen).

$$\text{Jährliche Nutzung}_{\text{Blockzeit}} = \sum_{1}^{x} \text{Blockzeit}_i$$

$$\text{Jährliche Nutzung}_{\text{Flugstrecke}} = \sum_{1}^{x} \text{Flugstrecke}_i$$

$$\text{Jährliche Nutzung}_{\text{Starts}} = \sum_{1}^{x} \text{Start}_i$$

mit:

$x =$  Alle Missionen eines Jahres

**Formel 3: Jährliche Nutzung des Fluggerätes**

Die jährliche Nutzung ist insbesondere für die Kostenallokation der jährlichen Fixkosten relevant. Auf Basis der Planbeschäftigung, ausgedrückt in geplanten jährlichen Blockstunden, werden die Kostensätze zur Verrechnung der fixen Gemeinkosten gebildet.

## 5.3 Definition des Modelumfanges

### **Modellumfang aus technischer Sicht:**

Die Kostenmodellierung wurde zur (Betriebs-) Kostenabschätzung der ALAADy Konfigurationen, insbesondere für die Tragschrauber-Konfiguration, konzipiert. Sie ist allerdings grundsätzlich für unbemannte Turboprop- oder kolbengetriebene Fluggeräte mit Tragflächen und ggf. Rotor, also für Flugzeuge und Tragschrauber, im Nutzlastbereich von etwa einer Tonne geeignet. Auf unbemannte Helikopter wird nicht explizit eingegangen, eine Anwendung ist bei adaptierten Kostenfunktionen aber durchaus denkbar.

### **Modellumfang aus rechtlicher / regulatorischer Sicht:**

Es wird explizit auf die „spezifische Kategorie“ der EASA, also auf die Konfiguration in Minimum Risk Configuration eingegangen. Dies schlägt sich insbesondere hinsichtlich

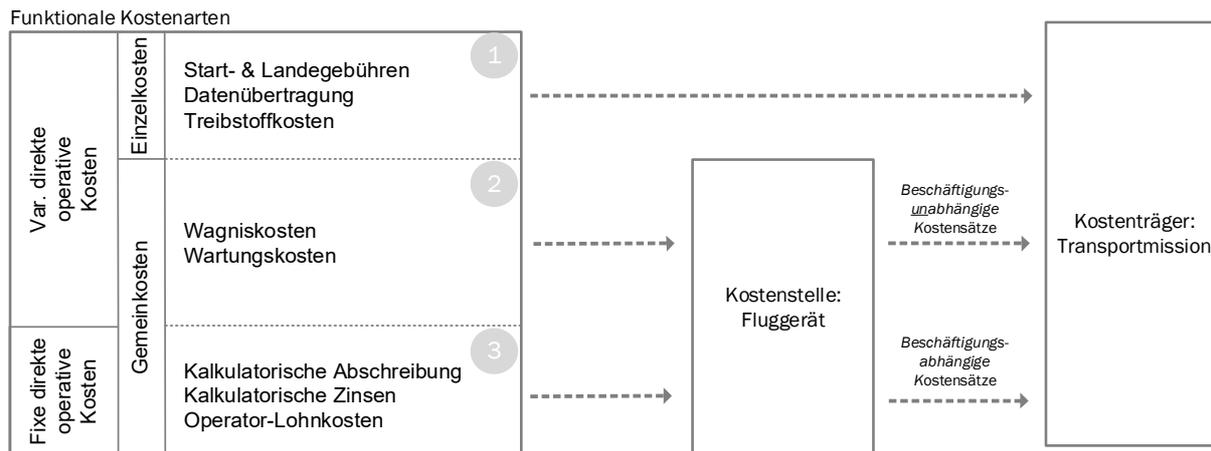
der Wagniskosten und der Vernachlässigung des Steig- und Sinkfluges sowie der Berücksichtigung des Umwegfaktors nieder.

Die berücksichtigten Kostenpositionen beruhen auf den in im ACOS-Modell, den DOC-Modellen und den von Conklin und de Decker berücksichtigten Kostenpositionen für bemannte Flugzeuge. Zudem werden die Kosten der Datenübertragung des C2 Links zwischen Fluggerät und Bodenstation berücksichtigt. Daraus ergibt sich aus Kostenartensicht folgender Modellumfang:

- Kalkulatorische Abschreibung
- Kalkulatorische Zinsen
- Wagniskosten
- Operator-Lohnkosten
- Treibstoffkosten
- Wartungskosten
  - Fluggerätezelle
  - Triebwerk
  - Rotor
  - Systeme (inkl. Bodenstation)
- Start- und Landegebühren
- Datenübertragung

## 5.4 Kostenverrechnung

Für Kostenverrechnung müssen die Kostenarten hinsichtlich ihrer Eigenschaften in Bezug auf den Kostenträger kategorisiert werden. Kostenarten, die in für die Transportmission Gemeinkosten darstellen werden mittels Kostensätze auf die Transportmissionen verrechnet. Einzelkosten können der Transportmission dagegen direkt zugeordnet werden. Einen Überblick über die Kostenverrechnung liefert Abbildung 21.

Abbildung 24: Kostenverrechnung<sup>135</sup>

Die Charakteristik der Kostenarten ist nicht immer eindeutig und unter anderem von den Kostenfunktionen der Kostenarten abhängig. Der Detailgrad des Aufbaus der Kostenverrechnung ist durch den Detailgrad der Kostenfunktionen bzw. Abschätzungen der Kostenarten beschränkt. Als Beispiel seien die Wartungskosten genannt, diese werden in vielen DOC-Modell in Form eines fixen Anteils, den so genannten Maintenance Burden, und einen variablen Anteil abgebildet. Der variable Anteil wird in einigen Modellen weiter in einen blockstundenbezogenen Teil und einen zyklusbezogenen Teil unterschieden. Dies ist nur möglich, weil sich diese Modelle zumeist auf IST-Kosten beziehen, wodurch die Daten in der entsprechenden Exaktheit verfügbar sind.

Die Kostenarten werden, wie in Abbildung 21 dargestellt, in der vorliegenden Kostenträgerstückrechnung wie folgt unterteilt:

1. Die Start- und Landegebühren, die Treibstoffkosten und die Kosten der Datenübertragung haben Einzelkosten-Charakter und werden tripbezogen abgeschätzt.
2. Die Wartungskosten sind aufgrund der blockstundenbezogenen Wartungsintervalle stark an die Nutzung gebunden, sie werden daher als variabel Kosten berücksichtigt. Sie können allerdings nicht ursächlich einer Transportmission direkt zugeordnet werden, die Verrechnung erfolgt daher mit Hilfe eines Kostensatzes. Selbiges gilt für die Wagniskosten, da diese über die Ausfallrate an die Blockstunden geknüpft sind.
3. Die kalk. Abschreibungen, kalk. Zinskosten und die Operatorlohnkosten haben überwiegenden Fixkostencharakter. Als Verteilungsschlüssel werden analog zum ACOS Modell<sup>136</sup> die Blockstunden verwendet. Dies hat zudem den Vorteil,

<sup>135</sup> Eigene Darstellung

<sup>136</sup> Kapitel 4.5.3

dass die gesamte Kostenmodellierung einen einheitlichen Verteilungsschlüssel aufweist.

## 5.5 Fixe direkte operative Gemeinkosten

Im folgenden Kapitel sollen die zu erwartenden Kostenarten und -funktionen näher betrachtet werden. Die Beschreibung der Kostenarten erfolgt in jedem Kapitel systematisch. Die in diesem Kapitel betrachteten Zusammenhänge bilden die Basis für ein Excel-Berechnungsblatt und enden jeweils mit Empfehlungen wie die daraus resultierenden Inputgrößen abgeschätzt werden können und was dabei beachtet werden muss.

### 5.5.1 Kalkulatorische Abschreibungen

Die Höhe der Abschreibungen wird durch vier Determinanten bestimmt:

- Abschreibungsmethode
- Abschreibungsbasis
- Restwert
- Nutzungsdauer

Die Abschreibungen sind für die Kostenkalkulation grundsätzlich in ihrer kalkulatorischen Ausprägung zu berücksichtigen. Als Abschreibungsbasis muss daher der Wiederbeschaffungswert verwendet werden. Daraus ergibt sich aber das Problem der Abschätzung dieses Wiederbeschaffungswertes. Aufgrund mangelnder Informationen ist eine fundierte Abschätzung der Wiederbeschaffungskosten derzeit unmöglich, weshalb sich diese Arbeit auf die Abschätzung der Entwicklungs- und Produktionskosten des Fluggerätes als Basis für die Abschreibung stützt. Kapitel 5.8 befasst sich ausführlich mit der Abschätzung der Entwicklungs- und Produktionskosten der in dieser Arbeit untersuchten Transportlösung. Diese Abschätzung ist, u.a. aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren, mit erheblichem Aufwand und Unsicherheiten verbunden. Als Abschreibungsmethode wird analog zur Kostenmodellierung nach Conklin und de Decker sowie dem ACOS Kostenmodell die lineare Abschreibung und somit die einfachste Methode gewählt.

*Nötige Modellinputs:*

- *Abschreibungsbasis*
- *Nutzungsdauer*
- *Restwert*

*Einschränkungen und Einflussgrößen:*

- Abschreibungsbasis: Wird als Abschreibungsbasis näherungsweise die Anschaffungskosten des Fluggerätes verwendet so gelten die in Kapitel 5.8 beschriebenen Einflussgrößen.
- Nutzungsdauer und Restwert: Die Wartungskosten werden über die Nutzungsdauer durch einen konstanten Wartungskostensatz berücksichtigt<sup>137</sup>, i.d.R. steigen die Wartungskosten allerdings mit einer gewissen Nutzungsdauer stark an. Dies gilt es bei der Abschätzung der Nutzungsdauer und des Restwertes zu berücksichtigen. Conklin und de Decker geht von konstanten Wartungskosten über einen Zeitraum von zehn Jahren und einem Restwert von 20 Prozent aus. Raymer gibt für die Abschreibung von kommerziellen Flugzeugen eine Nutzungsdauer von i.d.R. 12-14 Jahre an.

*Implementierte Formeln:*

$$\text{Kalk. Abschreibungen} = \frac{\text{Abschreibungsbasis} - \text{Restwert}}{\text{Nutzungsdauer}} \quad \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}} \right]$$

**Formel 4: Kalkulatorische Abschreibungen**

$$\text{Kostensatz}_{\text{Abschreibungen}} = \frac{\text{Kalk. Abschreibungen}}{\text{Jährliche Nutzung}} \quad \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$$

**Formel 5: Kostensatz Abschreibungen**

*Anmerkung: Die verwendete Abschreibungsmethode hat Auswirkungen auf die kalkulatorischen Zinskosten*

**5.5.2 Kalkulatorische Zinskosten**

Unter der Annahme der linearen Abschreibung baut sich die Kapitalbindung über die Nutzungsdauer von den Anschaffungskosten hin zum Restwert konstant ab.<sup>138</sup> Die kalkulatorischen Zinsen werden anhand der durchschnittlichen Kapitalbindung berücksichtigt, sie stehen also in Abhängigkeit zu den Anschaffungskosten und dem Restwert. Der Zinssatz ist eine betriebsindividuelle Größe, für die einerseits entscheidend ist ob die Finanzierung mit Eigen- oder Fremdkapital erfolgt und andererseits zu welchem Zinssatz Kapital ausgeliehen werden kann bzw. zu welchem Zinssatz Kapital zur Anlage kommen kann.<sup>139</sup>

*Nötige Modellinputs:*

- *Anschaffungskosten (siehe vorheriges Kapitel)*
- *Restwert (siehe vorheriges Kapitel)*

<sup>137</sup> Siehe Kapitel 5.6.1

<sup>138</sup> vgl. Kapitel 5.5.1

<sup>139</sup> vgl. Freidank (1997), S.128

- Zinssatz

*Einschränkungen und Einflussgrößen:*

- Der Zinssatz stellt i.a. eine für jedes Unternehmen individuelle Größe dar.

*Implementierte Formeln:*

$$\text{Kalk. Zinskosten} = \left( \frac{\text{Abschreibungsbasis} - \text{Restwert}}{2} + \text{Restwert} \right) * \text{Zinssatz} \quad \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}} \right]$$

**Formel 6: Kalkulatorische Zinskosten**

$$\text{Kostensatz}_{\text{Zinskosten}} = \frac{\text{Kalk. Zinskosten}}{\text{Jährliche Nutzung}} \quad \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$$

**Formel 7: Kostensatz Zinskosten**

### 5.5.3 Operatorlohnkosten

In Analogie zur Kostenmodellierung nach Conklin und de Decker erfolgt die Modellierung der Operatorlohnkosten in Form von Fixkosten. Als Operator(en) wird/werden jene Person(en) bezeichnet die, aus Unternehmenssicht, für die Überwachung bzw. (Fern-)Steuerung des Fluggerätes zuständig sind.

*Nötige Modellinputs:*

- Anzahl der Vollzeitäquivalente (VZÄ)
- Jährliche Lohnkosten eines VZÄ

*Einschränkungen und Einflussgrößen:*

Es ist offensichtlich, dass sowohl die Anzahl der erforderlichen VZÄ als auch die Lohnkosten pro VZÄ von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Zu diesen Faktoren zählen unter anderem:

- Erwartete jährliche Nutzung des Fluggerätes
- Autonomiegrad des Fluggerätes
- Rechtliche und Regulatorische Bestimmungen
- Nötige Qualifikation/Ausbildung des Operators
- Lohnniveau am Standort der Bodenstation (muss nicht zwangsweis dem Einsatzort des Fluggerätes entsprechen)
- Mögliche Synergieeffekte durch den parallelen Betrieb mehrere Fluggeräte

*Implementierte Formeln:*

$$\text{Lohnkosten} = \text{Anzahl der VZÄ} * \text{Jährliche Lohnkosten eines VZÄ} \quad \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}} \right]$$

**Formel 8: Lohnkosten**

$$Kostensatz_{Lohnkosten} = \frac{\text{Lohnkosten}}{\text{jährliche Nutzung}} \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$$

Formel 9: Kostensatz Lohnkosten

## 5.6 Variable direkte operative Gemeinkosten

Die variablen direkten operativen Gemeinkosten enthalten die Kostenarten Wartungskosten und Wagniskosten. Diese Kostenarten lassen sich nicht unmittelbar ursächlich auf eine Transportmission zuordnen, sie werden daher in Form von Kostensätzen auf die Transportmissionen verrechnet.

### 5.6.1 Wartungskosten

In der Luftfahrt wird zwischen Wartungen, welche im Rahmen des Flugbetriebs durchgeführt werden und Wartungen, welche die Unterbrechung des Flugbetriebs erfordern, unterschieden. In der kommerziellen Luftfahrt sind dies die Trip-Checks (vor jedem Flug), die Ramp-Checks (täglich) sowie die Service-Checks (wöchentlich). Die Abschätzung der Wartungskosten ist mit hoher Komplexität und Unsicherheit verbunden. Eine möglichst exakte Abschätzung kann am ehesten durch eine separate Abschätzung der Wartungskosten der wesentlichen Baugruppen bzw. Komponenten des Luftfahrzeuges erreicht werden. Aufgrund der verfügbaren Daten ist aus Sicht des Autors eine Einteilung in: Triebwerke, Struktur, Systeme und Rotor sinnvoll.

Die Wartungsaktivitäten in Bezug auf die Kolben- und Turbinentriebwerke lassen sich grob in die **Komplettüberholung der Triebwerke**, welche nach einer definierten Anzahl an Betriebsstunden erfolgen muss, als auch in laufende Wartung und Inspektion unterteilen. Die Zeitspanne zwischen den Komplettüberholungen wird als „Time-Between-Overhaul“ (TBO) bezeichnet. Anhand der in Kapitel 2.4.1 gemachten Angaben lässt sich für Kolbentriebwerke ein Intervall von etwa 1000 bis 2000 Betriebsstunden und für Turboprop-Triebwerke ein Intervall von etwa 3600 bis 4000 Betriebsstunden erkennen. Die Kosten der Triebwerksüberholung können gemäß Formel 10 auf die Blockstunden verteilt und damit anteilig den einzelnen Transportmissionen zugerechnet werden.

$$Kostensatz_{Triebwerksüberholung} = \frac{\text{Kosten der Überholung}}{TBO}$$

Formel 10: Kostensatz Triebwerksüberholung

Einen Anhaltspunkt für die Abschätzung der Höhe des Kostensatzes für die Triebwerksüberholung liefert Tabelle 11 am Ende dieses Kapitels.

Im Gegensatz dazu lassen sich die Kosten resultierend aus **laufender Wartung und Inspektion des Triebwerks** wesentlich schwieriger abschätzen. Aufschluss darüber könnten ggf. Erfahrungswerte aus der Allgemeinen Luftfahrt liefern, die es für das bzw.

die in Betracht gezogenen Triebwerke separat zu ermitteln gilt. Für die **Struktur und Systeme** gilt gleiches. Die Wartungskosten müssen bezogen auf die konkreten verbauten Systeme und die vorgesehenen bzw. erwarteten Wartungsarbeiten der Struktur im Einzelfall abgeschätzt werden.

Den letzten großen Posten hinsichtlich der Wartungskosten stellt der **Rotor** dar. Die Bauteile des Rotors müssen nach definierten Flugstunden ausgetauscht werden. Eine relativ exakte Abschätzung ist wiederum nur einzeln für eine konkrete Rotorbaugruppe möglich. Für eine erste Abschätzung kann eine relativ einfache Rotorbaugruppe, beispielsweise jene des relativ günstigen bzw. einfachen Bell 206 L4 Helikopters, herangezogen werden. Gemäß Produktspezifikation weisen die Rotorbauteile, die in Tabelle 10 ersichtlichen, begrenzte Lebensdauern auf. Die Ersatzteilekosten bezogen auf die Lebensdauer ergibt für diesen Rotor einen blockstundenbezogenen Kostensatz von etwa 50 Euro.

Teilenr.	Bauteil	Lebenszeit	Anzahl	Kosten pro Stk. <sup>140</sup>	Kostanteil
206-011-120-105	Trunnion	2400 h	1	3.910 USD	1,6 USD/h
206-011-150-105	Strap Fitting	2400 h	2	2.134 USD	1,8 USD/h
206-011-125-001	Strap Pin	1200 h	2	333 USD	0,6 USD/h
206-011-132-113A	Grip	4800 h	2	9.540 USD	4,0 USD/h
206-011-154-107	Tension-Torsion Strap	1200 h	2	4.827 USD	8,0 USD/h
206-011-260-101	Latch Bolt	1200 h	2	843 USD	1,4 USD/h
206-015-001-115	Main Rotor Blade	4000 h	2	55.420 USD	27,7 USD/h
206-040-535-109	Main Rotor Mast	5000 h	1	17.284 USD	3,5 USD/h
206-001-193-001	Cyclic Tube	4800 h	2	2.460 USD	1,0 USD/h
<b>Gesamt</b>					<b>49,6 USD/h</b>

Tabelle 10: Ersatzteilekosten Rotor Bell 206<sup>141</sup>

<sup>140</sup> Preise siehe Anhang, Kapitel 2

<sup>141</sup> vgl. Bell Helicopter: Bell 206L4 Product Specifications (2013), S.38, <http://www.indesaviation.com/wp-content/uploads/2014/11/206L4-Spec-Book-22013-Web.pdf> (gelesen am 26.01.2017)

*Nötige Modellinputs:*

- *Kostensatz Triebwerksüberholung*
- *Kostensatz Triebwerkswartung und -inspektion*
- *Kostensatz Wartung Struktur*
- *Kostensatz Wartung Systeme*
- *Kostensatz Wartung Rotor* (nur bei Tragschrauber-Konfiguration)

*Einschränkungen und Einflussgrößen:*

- *Triebwerksüberholung:*
  - Die Kosten der Triebwerksüberholung sind abhängig vom Triebwerkstyp. Eine Aufstellung der Kosten für die Überholung ausgewählter Triebwerkstypen kann Tabelle 11 entnommen werden.
  - Die derzeitigen Wartungsintervalle und Kosten beziehen sich auf die Bestimmungen und das nötige Sicherheitsniveau für die bemannte Luftfahrt. Eine mögliche Verringerung der Kosten und/oder Erhöhung der Wartungsintervalle aufgrund der veränderten Rahmenbedingungen muss ggf. berücksichtigt werden.
- *Wartungskosten Rotor:*
  - Die in Tabelle 10 dargestellten Werte liefern einen Anhaltspunkt für die Wartungskosten des Rotors anhand der Ersatzteilkosten des Bell 206 Ranger (MTOW ca. 2000 Kilogramm).

*Implementierte Formeln:*

Der Kostensatz für die Wartung des Fluggerätes setzt sich aus mehreren Kostensätzen zusammen. Im Kostenmodell werden folgende Kostensätze berücksichtigt:

<i>Kostensatz<sub>Triebwerksüberholung</sub></i>	$\left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$
<i>Kostensatz<sub>Triebwerkswartung und -inspektion</sub></i>	$\left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$
<i>Kostensatz<sub>Wartung Struktur</sub></i>	$\left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$
<i>Kostenstatz<sub>Wartung Systeme</sub></i>	$\left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$
<i>Kostensatz<sub>Wartung Rotor</sub></i>	$\left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$
<i>Kostensatz<sub>Wartung Gesamt</sub></i>	$\left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$

**Formel 11: Kostensatz Wartung gesamt**

Anmerkungen:

- *In der vorliegenden Kostenmodellierung ergeben sich die jährlichen Wartungskosten als Funktion der jährlichen Nutzung:*

$$\text{Wartungskosten} = \text{Kostensatz}_{\text{Wartung Gesamt}} * \text{Jährliche Nutzung} \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$$

**Formel 12: Jährliche Wartungskosten**

Hersteller			Textron Aviation		Piper Aircraft		Quest Aviation		Textron Aviation		Diamond Aircraft			
Modell			Cessna Caravan		M 500		Kodiak		Cessna 172		DA-40			
Triebwerk			PT6A-114A		PT6A-42A		PT6A-34		Lycoming IO-360-A1A		AE 300			
Triebwerktyp			Turboprop		Turboprop		Turboprop		Kolbentriebwerk		Kolbentriebwerk			
Treibstoff			Jet A		Jet A		Jet A		Flugbenzin (91/96)		Diesel			
Leistung		SHP	kW		675 <sup>142</sup>	500	500 <sup>143</sup>	370	700 <sup>144</sup>	519	180 <sup>145</sup>	133	167	124 <sup>146</sup>
Mid-Life Inspection		USD	EUR		31.200	25.366	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Überholungskosten		USD	EUR		225.000 <sup>147</sup>	182.927	200.000	162.602	235.000	191.057	31.500 <sup>148</sup>	25.610	22.000	16.700 <sup>149</sup>
Überholungsintervall		h		3.600		3.600		4.000		2.000		1.800 <sup>150</sup>		
Anteilige Überholungskosten pro Blockstunde		EUR / h		62,5	50,8	55,6	45,2	58,8	47,8	15,8	12,8	12,2	9,9	
<b>Anteilige leistungsspezifische Überholungskosten pro Blockstunde</b>		<b>EUR / 100kW / h</b>		<b>10,2</b>		<b>12,2</b>		<b>9,2</b>		<b>9,6</b>		<b>7,5</b>		

Tabelle 11: Intervalle und Kosten der Komplettüberholung ausgewählter Triebwerke<sup>151</sup>

<sup>142</sup> <http://cessna.txtav.com/en/turboprop/caravan> (gelesen am 24.01.2017)

<sup>143</sup> <http://www.piper.com/aircraft/m-class/m500/performance/> (gelesen am 24.01.2017)

<sup>144</sup> <http://questaircraft.com/the-kodiak/specifications-option/> (gelesen am 24.01.2017)

<sup>145</sup> <https://www.lycoming.com/node/16861> (24.01.2017)

<sup>146</sup> [http://austroengine.at/uploads/pdf/mod\\_products/1/AE300\\_Technical\\_Data\\_Sheet.pdf](http://austroengine.at/uploads/pdf/mod_products/1/AE300_Technical_Data_Sheet.pdf) (gelesen am 24.01.2017)

<sup>147</sup> Aviation Week Network: Operations Planning Guide (2016), S.26,

<http://aviationweek.com/datasheet/2016-bca-operations-planning-guide-production-aircraft> (gelesen am 09.02.2017)

<sup>148</sup> Lycoming Engine: Aftermarket Engine Price List (2012), S.5,

[http://www.piper-germany.de/fileadmin/Dokumente/global/spareparts/pdf/Lycoming\\_Engine\\_PriceList\\_2012.pdf](http://www.piper-germany.de/fileadmin/Dokumente/global/spareparts/pdf/Lycoming_Engine_PriceList_2012.pdf) (gelesen am 24.01.2017)

<sup>149</sup> <http://www.diamond-air.at/de/media-center/pressemeldungen/aktuelles/article/1500-hours-tbo-for-austro-engines-ae300/> (gelesen am 27.01.2017)

<sup>150</sup> <http://www.diamond-air.at/de/media-center/pressemeldungen/aktuelles/article/austro-engine-ae300-receives-easa-certificate-for-1800-hour-tbo/> (gelesen am 27.01.2017)

<sup>151</sup> Eigene Darstellung basierend auf oben angeführten Quellen

## 5.6.2 Kalkulatorische Wagniskosten

Ein wesentlicher Unterschied zwischen unbemannten Fluggeräten und Fluggeräten der Allgemeinen Luftfahrt stellt, nach derzeitigem Stand der Technik, die wesentlich höhere Ausfallwahrscheinlichkeit dar. Durch betriebliche Maßnahmen, wie das fliegen über unbewohnte Gebiete etc., soll dennoch ein gleich hohes Sicherheitsniveau wie bei der bemannten Luftfahrt erreicht werden. Nichtsdestotrotz ist bei Ausfällen ggf. mit Sachschäden an Fluggerät und Ladung zu rechnen. Dieser Zusammenhang soll mit den kalkulatorischen Wagniskosten berücksichtigt werden. Wie wichtig dies ist zeigt folgendes Beispiel: Bei einer Nutzung von 5 Stunden täglich, würde es bei einer Ausfallsrate von 1:10.000 im Mittel alle 5,5 Jahr zu einem Ausfall kommen. Durch den Bezug der Ausfallsrate auf die Blockstunden wird schnell deutlich, dass es sich um nutzungsvariable Kosten handelt.

*Erforderliche Modellinputs:*

- *Ausfallsrate*
- *Erwartete Schadenshöhe*

*Einschränkungen und Einflussgrößen:*

- Die Schadenshöhe/Ausfallrate kann durch div. technische Vorkehrungen wie beispielsweise Fallschirmsysteme ggf. verringert werden. Sofern solche Systeme mit signifikanten Anschaffungs- bzw. Wartungskosten verbunden sind, müssen diese bei den Abschreibungen bzw. Wartungskosten berücksichtigt werden.
- Wirtschaftliche Schäden im weiteren Sinne wie Imageverlust bzw. Folgeschäden durch verspätete Lieferungen und/oder Ausfall der Lieferung können meist nur schwer abgeschätzt werden.

*Implementierte Formeln:*

$$\text{Kostensatz}_{\text{Wagniskosten}} = \frac{\text{Erw. Schadenshöhe}}{\text{Ausfallsrate}} \quad \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Blockstunde}} \right]$$

**Formel 13: Kostensatz Wagniskosten**

*Anmerkungen:*

- *Die jährlichen Wagniskosten sind abhängig von der jährlichen Nutzung und ergeben sich mit folgender Formel:*

$$\text{Wagniskosten} = \text{Kostensatz}_{\text{Wagniskosten}} * \text{Jährliche Nutzung} \quad \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}} \right]$$

**Formel 14: Jährliche Wagniskosten**

## 5.7 Variable direkte operative Einzelkosten

### 5.7.1 Treibstoffkosten

Die Treibstoffkosten haben wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit Lufttransportsysteme. Durch wesentlich höhere spezifische Kraftstoffverbräuche im Vergleich zu straßengebundenen Transportmitteln ist mit stärkeren Einflüssen schwankender Kraftstoffpreise zu rechnen.<sup>152</sup>

#### Treibstoffpreis

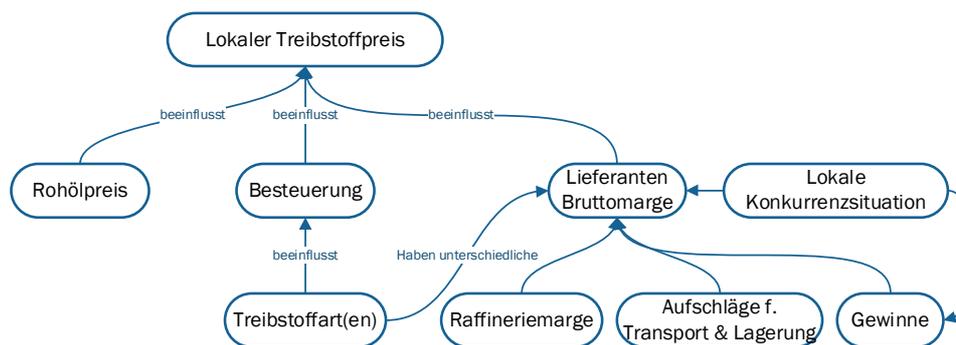


Abbildung 25: Einflussfaktoren auf den Treibstoffpreis<sup>153</sup>

Der Treibstoffpreis bildet das Preisgerüst der Treibstoffkosten. Aufgrund der monopolartigen Situation der Treibstoffversorgung an vielen Flugplätzen gilt es stets die lokalen Treibstoffpreise zu beachten. Eine Vielzahl der lokalen Preisen für die Allgemeine Luftfahrt kann z.B. tagesaktuell der Shell Datenbank<sup>154</sup> entnommen werden. Ist der lokale Treibstoffpreis nicht bekannt oder soll eine zukünftige Preisabschätzung getroffen werden so gilt es den Rohölpreis, die Besteuerung und die Lieferanten Bruttomarge zu beachten.

#### Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch bildet das Mengengerüst der Treibstoffkosten. Beim Kraftstoffverbrauch werden sowohl technologische als auch operative Faktoren tragend. Der Treibstoffverbrauch der vorliegenden Kostenabschätzung wurde auf drei Faktoren basierend modelliert:

- Der benötigten Triebwerksleistung für den Reiseflug unter bestimmten betrieblichen Rahmenbedingungen (Nutzlast und Geschwindigkeit)
- Dem spezifischen Kraftstoffverbrauch der Turbine(n)

<sup>152</sup> vgl. Boeing: World Air Cargo Forecast (2019), S.2, [www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf) (gelesen am 27.03.2017)

<sup>153</sup> Eigene Darstellung

<sup>154</sup> <http://www.shell.com/business-customers/aviation/ppp/our-posted-airfield-prices.html> (gelesen am 03.02.2017)

- Der Länge der Flugstrecke

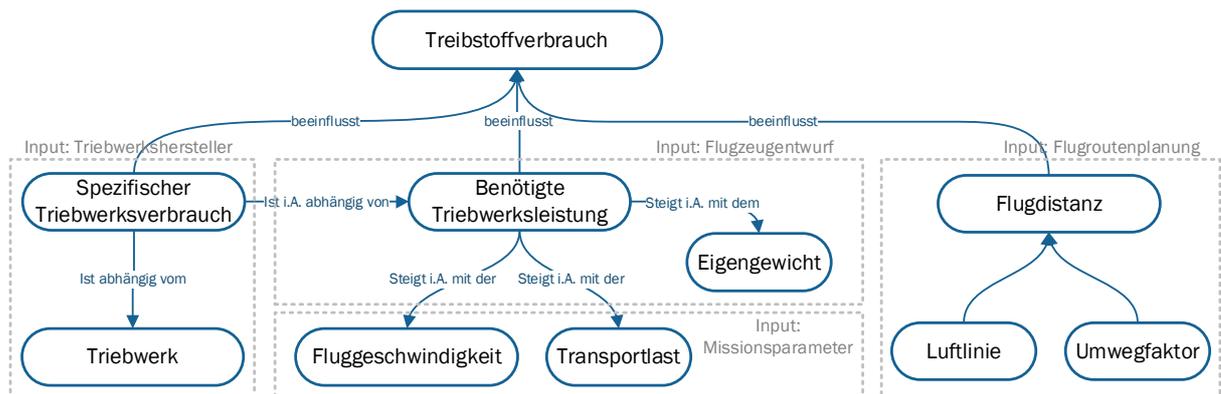


Abbildung 26: Einflussfaktoren auf den Treibstoffverbrauch<sup>155</sup>

Die **benötigte Triebwerksleistung** für den Reiseflug hängt unter anderem von den Wirkungsgraden der Propeller und des Antriebstrangs, sowie den aerodynamischen Kennzahlen des Fluggerätes ab. Diese Faktoren sind i.d.R. wiederum von der Fluggeschwindigkeit abhängig. Die Berechnung der nötigen Triebwerksleistung muss individuell für jedes betrachtete Fluggerät durchgeführt werden. Dies stellt eine flugmechanische Problemstellung dar und ist daher nicht Teil dieser Arbeit. Für das ALAADy Fluggerät wurden die benötigte Triebwerksleistung für verschiedenen Nutzlast-Geschwindigkeits-Kombinationen vom DLR Institut für Flugsystemtechnik durchgeführt. Die berechneten Werte können Tabelle 12 entnommen werden.

		Geschwindigkeit				
		160 km/h	180 km/h	200 km/h	220 km/h	240 km/h
Nutzlast	300 kg	97 kW	110 kW	129 kW	154 kW	186 kW
	500 kg	110 kW	121 kW	139 kW	163 kW	194 kW
	750 kg	127 kW	137 kW	153 kW	176 kW	206 kW
	1000 kg	148 kW	155 kW	169 kW	191 kW	219 kW

Tabelle 12: Benötigte Triebwerksleistung für versch. Geschwindigkeiten und Nutzlasten<sup>156</sup>

Der **spezifische Kraftstoffverbrauch** eines Triebwerkes ist i.A. leistungsabhängig. Triebwerkshersteller geben entweder spezifische Kraftstoffverbräuche für ausgewählte Leistungswerte oder den gesamten Verlauf des spezifischen Kraftstoffverbrauchs an. Ist das verwendete Triebwerk bekannt können die triebwerkseigenen Daten verwendet werden. Für eine erste Abschätzung ging das Institut für Flugsystemtechnik im Rahmen des ALAADy Projektes von einem konstanten spezifischen Kraftstoffverbrauch von 0,32 Kilogramm Kerosin pro Kilowattstunde aus.

<sup>155</sup> Eigene Darstellung

<sup>156</sup> vgl. Internes Arbeitspapier ALAADy Projekt, Berechnungen wurden vom Institut für Flugsystemtechnik des DLR in Braunschweig durchgeführt und zur Verfügung gestellt.

Die **tatsächliche Flugstrecke** ist i.A. länger als die Luftlinie zwischen Start und Ziel. Im Zuge der Risikominimierung müssen Mindestabstände zu bewohnten Gebieten und Infrastruktur eingehalten werden. Im Zuge des ALAADy Projektes wird an einem sogenannten Flugroutenplaner gearbeitet, der die beste Route zwischen Start und Ziel berechnet. Zur Kostenkalkulation sollte die tatsächliche Flugstrecke verwendet werden. Die Länge der Flugstrecke ist abhängig von einer Vielzahl von Aspekten der Risikominimierung, welche von der Luftlinie und dem Umwegfaktor abhängt, bestimmt in Kombination mit der Geschwindigkeit die benötigte Zeit zur Durchführung der Flugphase und lässt in Kombination mit der benötigten Triebwerksleistung und dem spezifischen Kraftstoffverbrauch auf den Kraftstoffverbrauch für die Flugphase schließen (siehe Tabelle 13 und Tabelle 14).

		Geschwindigkeit				
		160 km/h	180 km/h	200 km/h	220 km/h	240 km/h
Strecke	200 km	1,25 h	1,11 h	1,00 h	0,91 h	0,83 h
	400 km	2,50 h	2,22 h	2,00 h	1,82 h	1,67 h
	600 km	3,75 h	3,33 h	3,00 h	2,73 h	2,50 h

**Tabelle 13: Benötigte Zeit zur Durchführung der Flugphase für versch. Geschwindigkeiten und Strecken<sup>157</sup>**

		Geschwindigkeit				
		160 km/h	180 km/h	200 km/h	220 km/h	240 km/h
Nutzlast	300 kg	116 kg	117 kg	124 kg	134 kg	149 kg
	500 kg	132 kg	129 kg	133 kg	142 kg	155 kg
	750 kg	152 kg	146 kg	147 kg	154 kg	165 kg
	1000 kg	178 kg	165 kg	162 kg	167 kg	175 kg

**Tabelle 14: Kraftstoffverbrauch für 600 Kilometer<sup>158</sup>**

*Erforderliche Modellinputs:*

- *Treibstoffpreis*
- *Spezifischer Treibstoffverbrauch (Geschwindigkeits- und Nutzlastabhängig)*
- *Luftlinie und Umwegfaktor bzw. falls bekannt Flugstrecke*

*Erforderliche Modellinputs:*

- *Flugdistanz*
- *Fluggeschwindigkeit*
- *Benötigte Triebwerksleistung*
- *Spezifischer Kraftstoffverbrauch*
- *Lokaler Treibstoffpreis*

<sup>157</sup> vgl. Internes Arbeitspapier ALAADy Projekt, Berechnungen wurden vom Institut für Flugsystemtechnik des DLR in Braunschweig durchgeführt und zur Verfügung gestellt.

<sup>158</sup> vgl. ebenda

- *Dichte des Treibstoffes*

*Einschränkungen und Einflussgrößen:*

- Flugdistanz: siehe Kapitel 5.1

*Implementierte Formeln:*

$$\text{Kraftstoffverbrauch} = \text{Benötigte Triebwerksleistung} * \text{spezif. Kraftstoffverbrauch} * \frac{\text{Flugdistanz}}{\text{Fluggeschwindigkeit}} [\text{kg}]$$

#### **Formel 15: Kraftstoffverbrauch**

$$\text{Kraftstoffkosten} = \text{Kraftstoffverbrauch} * \text{lokaler Kraftstoffpreis} [\text{Euro}]$$

#### **Formel 16: Kraftstoffkosten**

*Anmerkung: Die jährlichen Treibstoffkosten ergeben sich additiv aus den Treibstoffkosten der einzelnen Missionen.*

### **5.7.2 Start- und Landegebühen**

Die Flughafenentgelte haben direkten Bezug zur durchgeführten Mission und sollten daher im Idealfall exakt für den Start- und Zielflugplatz erhoben bzw. abgeschätzt werden. Start- und Landegebühen stehen meist in Zusammenhang mit einer Fluggerät bezogenen Gewichtsangabe (MTOW). Je nach angeflogenen Flugplatz können die Gebühen stark schwanken.

*Erforderliche Modellinputs:*

- *Startgebüher am Abflugort*
- *Landegebüher am Zielort*

### **5.7.3 Datenübertragung**

Die Kommunikationsverbindung zwischen Fluggerät und Kontrollstation wird als „Command and Control (C2) link“ bezeichnet. Die Ausführung einer Kontrollstation kann von einem kleinen mobilen Gerät bis hin zu einer vollständigen Kommandozentrale ausfallen.<sup>159</sup> Grundsätzlich kann ein Fluggerät während dem Flug von einer oder mehreren Kontrollstationen gesteuert werden. Das Manual on „Remotely Piloted Aircraft Systems“ der ICAO sieht nicht zwingend eine redundante Kommunikationsverbindung vor.<sup>160</sup> Hinsichtlich der Art der Datenübertragung gilt es

<sup>159</sup> vgl. Kapitel 2.2

<sup>160</sup> vgl. International Civil Aviation Organization: Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (2015), [http://www.caa.ro/media/docs/RPAS\\_ICAO\\_Manual.pdf](http://www.caa.ro/media/docs/RPAS_ICAO_Manual.pdf) (gelesen am 09.02.2019)

zwischen „Direct radio line-of-sight“ (RLOS) und „Beyond radio line-of-sight“ (BRLOS) zu unterscheiden.

In Bezug auf die nötigen Steuereingaben kann in:

- Direkte Kontrolle
- Wegpunktsteuerung und
- Autopilotenbetrieb

unterschieden werden. Darauf ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Datenlink bzw. erforderliche Datenraten. Eine sehr umfangreiche Auseinandersetzung mit den Anforderungen hinsichtlich des erforderlichen Frequenzbereiches bzw. der nötigen Bandbreite liefert die Internationale Fernmeldeunion (eng. International Telecommunication Union, ITU) in einem zu diesem Thema im Dezember 2012 veröffentlichten Bericht (ITU-R M.2171).

Sowohl die ICAO also auch die ITU gehen von einem Bedarf eines terrestrischen und eines satellitengestützten Systems aus. Die ITU unterscheidet für den Einsatz im allgemeinen Luftraum vier Verursacher des Datenverkehrs:<sup>161</sup>

- Steuerungs- und Kontrolleingaben
- Kommunikation mit der Flugverkehrskontrolle
- Unterstützung des „Detect and Avoid“ Systems
- Video und Wetterradar

Die erforderlichen Datenraten aggregieren sich aus diesen Anwendungsbereichen. Einen Überblick der laut ITU erforderlichen Datenraten, aufgeschlüsselt nach Verursacher, kann Tabelle 15 entnommen werden.

Steuerungs- und Kontrolleingaben	Kommunikation mit Flugverkehrskontrolle	Sense and Avoid	Video und Wetterradar
12.167 bit/s	2 x 4.855 bit/s	9.120 bit/s	
30.997 bit/s			270.000 bit/s

**Tabelle 15: Laut ITU erforderliche Datenraten<sup>162</sup>**

Das Mengengerüst ergibt sich kumulativ aus den, während einer Transportmission, übertragenen Datenmengen. Das Preisgerüst ist dagegen abhängig von der verwendeten Übertragungstechnologie. In dieser Arbeit wird Mobilfunktechnologie stellvertretend für terrestrische Übertragungstechnologien und Datenübertragung per Satellit berücksichtigt.

<sup>161</sup> vgl. International Telecommunication Union: Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace (2009), S.3, [www.itu.int/en/ITU-R/space/snl/Documents/R-REP-M.2171-2009-PDF-E.pdf](http://www.itu.int/en/ITU-R/space/snl/Documents/R-REP-M.2171-2009-PDF-E.pdf) (gelesen am 03.01.2017)

<sup>162</sup> vgl. ebenda

Aufgrund der geringen Flughöhe wäre eine **Datenübertragung per Mobilfunk** denkbar. Aus Kostensicht könnte sich die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur als klarer Vorteil erweisen. Als nachteilig könnte sich allerdings die geringe Netzabdeckung in unbewohnten Gebieten erweisen. Eine mögliche erste Abschätzung des Preisgerüsts kann für die EU anhand eines von der Europäischen Kommission ausgearbeitet Reportes in Bezug auf den Europäischen Roaming Markt getroffen werden. Dieser beinhaltet eine Abschätzung der Kosten der Datenübertragung für die Mobilfunkbetreiber in den einzelnen Ländern. Diese betragen je nach Land zwischen 0,2 Euro pro Gigabyte in Zypern und 1,8 Euro pro Gigabyte in Malta. Die Kosten in Deutschland liegen mit 0,6 Euro pro Gigabyte im Mittelfeld.<sup>163</sup>

Für die **Datenübertragung per Satellit** sind die Kosten erheblich höher. Die Kosten liegen laut Dodel und Eberle zwar unter 1 Euro pro Megabyte und könnten in Zukunft weiter auf 0,01 Euro pro Megabyte sinken.<sup>164</sup> Diese Werte sind allerdings immer noch mindestens um den Faktor 10 höher als die oben genannten Kosten für die Datenübertragung per Mobilfunk.

#### *Erforderliche Modellinputs:*

- *Durchschnittlich benötigte Datenrate*
- *Kostensätze der verwendeten Übertragungstechnologien*
- *Prozentuale Aufteilung zwischen den Übertragungstechnologien (Anteile)*

#### *Einschränkungen und Einflussgrößen:*

- *Die erforderlichen Datenraten sind vom Autonomiegrad des Fluggerätes abhängig.*
- *Die Preisstruktur ist stark von verwendeten Übertragungstechnologie abhängig.*

#### *Implementierte Formeln:*

$$\text{Datenübertragungskosten} = \emptyset \text{ Datenrate} * (\text{Kostensatz}_{\text{ÜT1}} * \text{Anteil}_{\text{ÜT1}} + \text{Kostensatz}_{\text{ÜT2}} * \text{Anteil}_{\text{ÜT2}})$$

mit:

ÜT1 ... Übertragungstechnologie 1

ÜT2 ... Übertragungstechnologie 2

#### **Formel 17: Datenübertragungskosten**

<sup>163</sup> vgl. Europäische Kommission: Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the review of the wholesale roaming market (2016), S.55, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016SC0200&from=EN> (gelesen am 01.12.2017)

<sup>164</sup> vgl. Dodel und Eberle (2007), S.406

## 5.8 Exkurs: Entwicklungs- und Produktionskosten

Kenntnisse über die Anschaffungskosten eines Fluggerätes werden für die Berechnung der Abschreibung, der kalkulatorischen Zinsen und ggf. zur Abschätzung der Schadenshöhe und damit zur Abschätzung der Wagniskosten benötigt. Die Abschätzung von Entwicklungs- und Produktionskosten eines neuen Fluggerätes stellt naturgemäß eine überaus anspruchsvolle Aufgabe dar. Wie in Kapitel 4.5.4 dargestellt, eignet sich das modifizierte DAPCA-IV Modell für die Abschätzung der Entwicklungs- und Produktionskosten von Flugzeugen der Allgemeinen Luftfahrt. In dieser Arbeit werden Teile dieser Methodik zur Abschätzung der Kosten der Flugzeugzelle, Triebwerke und Propeller verwendet. Die vorgenommenen Modifikationen umfassen folgende Punkte:

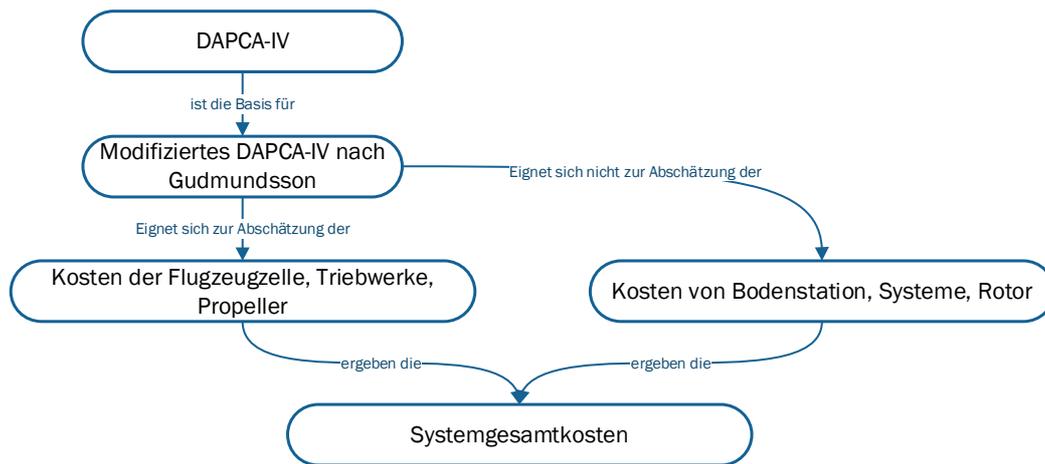
- Für die Umrechnung der Kosten von US-Dollar in Euro wurde ein Wechselkursfaktor eingeführt.
- Alle in Zusammenhang mit der Steuerung bzw. Autonomie des Fluggerätes stehenden Kosten (Bodenstation, Datenlink, etc.) sowie der Rotor sind von der Methodik nicht abgedeckt und werden separat abgeschätzt.

Das Kostenmodell zur Abschätzung der Anschaffungskosten des unbemannten Fluggerätes lässt sich demnach in zwei Hauptteile gliedern:

- Der erste Teil umfasst einer modifizierten Version des DAPCA-IV Modells für die Allgemeine Luftfahrt von Gudmundsson zur Abschätzung der Kosten der Flugzeugzelle, Propeller und Triebwerke. Die Unterschiede zu ursprünglichen Versionen liegen in der Berücksichtigung eines Dollar – Euro Wechselkurses sowie den Vereinfachungen hinsichtlich Klappensysteme, Druckkabine und Doppeltrapezflügel.<sup>165</sup>
- Der zweite Teil umfasst die Abschätzung der Kosten für Rotor, Systeme und Bodenstation

---

<sup>165</sup> Komplexe Klappensysteme, Druckkabinen und Doppeltrapezflügel sind für die angedachten unbemannten Fluggeräte nicht relevant. Deren Einflüsse werden daher vernachlässigt



**Abbildung 27: Abschätzung der Systemgesamtkosten<sup>166</sup>**

Abbildung 28 zeigt die Zusammenhänge zwischen Inputs und Outputs im Model und die Gliederung des Modells in die zwei Hauptteile. Inputs sind als braune Rechtecke dargestellt, Zwischenergebnisse als blaue Rechtecke. Die entsprechenden Formeln können dem Formelverzeichnis entnommen werden.

<sup>166</sup> Eigene Darstellung

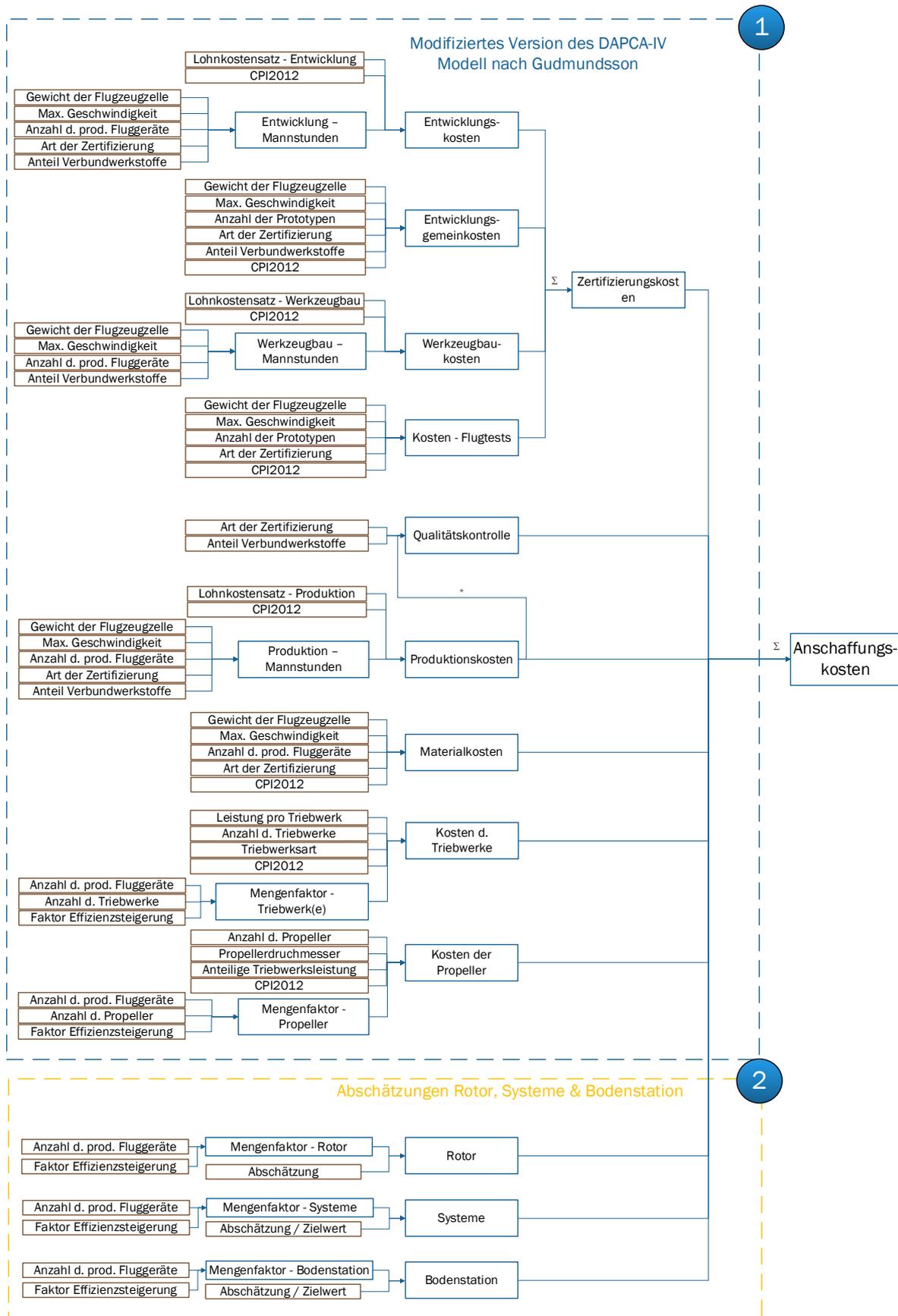


Abbildung 28: Abschätzung der Anschaffungskosten Input – Output Darstellung<sup>167</sup>

<sup>167</sup> Eigene Darstellung

## 5.8.1 Input-Parameter

### Zusammenhang der Inputparameter und der Zwischenergebnisse

Im Zuge des Flugzeugentwurfes ist oftmals von Interesse welchen Einfluss eine konkrete Konstruktionsentscheidung auf die Anschaffungskosten ausübt. Eine Vielzahl der Konstruktionsentscheidungen spiegeln sich in den Input-Parameter wieder. Tabelle 17 liefert Aufschluss ob eine Input-Parameter in direkten bzw. indirekten Zusammenhang mit einem Zwischenergebnis steht. Die Input-Parameter sind der ersten Zeile eingetragen, die Zwischenergebnisse in der ersten Spalte.

	Anzahl der produzierten Fluggeräte	Gewicht d. Flugzeugzelle	Max. Geschwindigkeit	Art der Zertifizierung	Anteil Verbundwerkstoffe	Anzahl der Triebwerke	Leistung pro Triebwerk	Triebwerksart	Propellerdurchmesser	Anzahl der Prototypen	Lohnkosten Entwicklung	Lohnkosten Werkzeugbau	Lohnkosten Produktion	Mengenfaktor	CPI2012	Wechselkurs
Entwicklung - Mannstunden	x	x	x	x	x											
Werkzeugbau - Mannstunden	x	x	x		x											
Entwicklungskosten	o	o	o	o	o						x				x	x
Werkzeugbaukosten	o	o	o		o							x			x	x
Entwicklung - Overhead und Support		x	x	x	x					x					x	x
Kosten Flugtests		x	x	x						x					x	x
Produktion - Mannstunden	x	x	x	x	x											
Produktionskosten	o	o	o	o	o								x		x	
Qualitätskontrolle	o	o	o	o/x	o/x										o	
Materialkosten	x	x	x	x											x	
Triebwerkskosten	o					x	x	x						x	x	
Kosten d. Propeller	o						x		x					x	x	
Rotor														x		
Systeme														x		
Bodenstation														x		

(x) direkter Zusammenhang; (o) indirekter Zusammenhang

Tabelle 16: Zusammenhänge zwischen den Input und Outputgrößen<sup>168</sup>

<sup>168</sup> Eigene Darstellung

## Anmerkungen zu den Inputparametern

- Anzahl der produzierten Fluggeräte über fünf Jahre

Die Anzahl der produzierten Fluggeräte stellt einen zentralen Inputparameter für die Anschaffungskosten des Fluggerätes dar. Im Modell bezieht sich dieser auf einen Zeitraum von fünf Jahren. Bei der Festlegung dieses Parameters ist insbesondere zu beachten, dass für die produzierte Stückzahl auch ein entsprechend großer Absatzmarkt vorhanden sein muss. Für die potentielle Größe eines solchen Absatzmarktes liefert Kapitel 2.3 erste Anhaltspunkte.

- Art der Zertifizierung

Das Modell berücksichtigt den Einfluss der Zertifizierungsart. Es kann zwischen Vorgaben der FAA für die Lufttüchtigkeit von Flugzeugen mit bis zu neun Passagieren und einem maximalen Abfluggewicht von 12.500 Pfund („Part 23“) sowie den Vorgaben der FAA für so genannte „Light Sports Aircraft“ (LSA) mit einem maximalen Abfluggewicht von 600 Kilogramm unterschieden werden.

- Lohnkostensatz

Die Lohnkostensätze für Entwicklung, Werkzeugbau und Produktion sind mit dem Verbraucherpreisindex behaftet. Es können daher die von Gudmundsson vorgeschlagenen Wert von 92 Dollar für die Entwicklung, 61 Dollar für den Werkzeugbau und 53 Dollar für die Fertigung im Bezugsjahr 2012 verwendet werden. Werden aktuelle Lohnkostensätze verwendet darf der Verbraucherpreisindex nicht mehr zusätzlich berücksichtigt werden.

- Verbraucherpreisindex

Der Verbraucherpreisindex (Consumer Price Index – CPI) wird verwendet, um die Formeln vom Basisjahr 2012 anzupassen. Aktuelle Daten können vom Bureau of Labor Statistics bezogen werden.<sup>169</sup>

- Konvertierung in Euro

Die Umrechnung erfordert die Festlegung eines Währungskurses. Zu diesem Zweck erscheint es sinnvoll angesichts des betrachteten Produktionszeitraumes von fünf Jahren für den Wechselkurs ebenfalls einen über fünf Jahre gemittelten Wert zu verwenden. Die gemittelten Wechselkurse für den Zeitraum von 2012 bis 2016 bzw. 2007 bis 2016 lag dagegen mit 1,23 bzw. 1,31 Euro je US-Dollar deutlich höher.

---

<sup>169</sup> [www.bls.gov/cpi/](http://www.bls.gov/cpi/) (gelesen am 27.01.2017)

## 5.8.2 Berechnungsbeispiel

### Szenario 1 (100 Produzierte Stück)

Im Folgenden sollen die Anschaffungskosten für das ALAADy Fluggerät (Kapitel 2.2.4) ermittelt werden. Dafür kommt das im vorherigen Kapitel beschriebene modifizierte DAPCA-IV Modell verwendet.

Für die Berechnung muss eine Reihe von Parametern definiert werden.

Das **Gewicht der Flugzeugzelle** setzt sich aus der Strukturmasse des Rumpfes, der Masse des Leitwerkes und der Masse der Flügel zusammen. Gemäß der in Kapitel 2.2.4 gemachten Angaben beträgt das Gewicht der Flugzeugzelle in Summe 560 Kilogramm.

Struktur-Rumpf	410 kg
Leitwerk	80 kg
Flügel	70 kg
$\Sigma$	560 kg

**Tabelle 17: Masse der Flugzeugzelle**

Die **Leistungsdaten** sind definiert durch eine maximale Fluggeschwindigkeit von 200 Kilometer pro Stunde, einer Triebwerksleistung von 2 x 200 Kilowatt. Die **geplante Stückzahl** über fünf Jahre ist in großem Maße von der am Markt absetzbaren Stückzahl getrieben und mit großer Unsicherheit behaftet. Basierend auf den in Kapitel 2.3 dargestellten Zusammenhänge wird in einer sehr optimistischen Schätzung von maximal 100 absetzbaren Stück über fünf Jahre ausgegangen. Eine zweite, weiter unten durchgeführte Berechnung geht anschließend von einer etwas konservativen Schätzung von 30 absetzbaren Stück über fünf Jahre aus. Für die **Lohnkosten** wurden die ursprünglich von Gudmundsson empfohlenen Wert verwendet. Der **Verbraucherpreisindex** 2016 basierend auf dem Basisjahr 2012 beträgt 1,05.<sup>170</sup> Der berücksichtigte **Wechselkurs** beträgt 1,23 Euro je US-Dollar und entspricht dem gemittelten Wechselkurs der Jahre 2012 bis 2016. Im Modell sind zwei **Arten der Zertifizierung** berücksichtigt, nach Part23 und LSA Vorgaben. Um den erwarteten geringeren Anforderungen an das Fluggerät gerecht zu werden geht der Autor hier von einer Zertifizierung nach LSA-Vorgaben aus. Die **Anzahl der Prototypen** wurde mit drei festgelegt.

<sup>170</sup> [www.bls.gov/cpi/](http://www.bls.gov/cpi/) (gelesen am 27.01.2017)

Die Berechnung unterteilt sich in folgende Zwischenschritte:

1. Berechnung der Zertifizierungskosten
2. Berechnung der Material-, Produktions- und Qualitätssicherungskosten
3. Berechnung der Kosten für Triebwerke und Propeller
4. Abschätzung weiterer Kostenelemente wie Rotor, Systeme und Bodenstation

### **Berechnung der Zertifizierungskosten:**

Die Zertifizierungskosten setzen sich zusammen aus den Entwicklungskosten, den Entwicklungsgemeinkosten, den Werkzeugbaukosten und den Kosten der Flugtests. Für die eine geplante Stückzahl 100 Stück über fünf Jahre ergeben sich die in Tabelle 18 dargestellten Zertifizierungskosten.

Entwicklung	3.587.278 EURO
Entwicklungsgemeinkosten	140.424 EURO
Flugtests	798.715 EURO
Werkzeugbau	3.783.417 EURO
<b>Zertifizierungskosten</b>	<b>8.309.835 EURO</b>

**Tabelle 18: Zertifizierungskosten**

### **Berechnung der Material-, Produktions- und Qualitätssicherungskosten:**

Produktionskosten	18.927.400 EURO
Qualitätskontrolle	1.230.281 EURO
Material	1.532.386 EURO

**Tabelle 19: Material-, Produktions- und Qualitätssicherungskosten**

Die Kosten der Triebwerke und Propeller werden als Zukaufteile betrachtet und deren Preise mittels der von Gudmundsson angedachten Schätzformeln ermittelt. Zusätzlich kommt ein mengenabhängiger Rabatffaktor zu Tragen.

Die Kostenabschätzung für den Rotor, für die Systeme und für die Bodenstation müssen separat erfolgen. Für die Kosten des Rotors ist keine Schätzformel bekannt. Abhilfe konnte hier durch die Verwendung von realen Preisen eines ähnlichen Rotorsystems geschaffen werden. Als Referenz wurde, aufgrund seiner günstigen Bauweise und des ähnlichen maximalen Abfluggewichtes von etwas zwei Tonnen<sup>171</sup>, der Bell 206 L4 Helikopter herangezogen. Die Ersatzteilpreise konnten durch eine Anfrage bei der Atlas Air Service AG, dem offiziellen Vertriebspartner von Bell in Deutschland, ermittelt werden (siehe Anhang „Angebot Rotorbaugruppe Bell“). Die

<sup>171</sup> vgl. Bell Helicopter: Bell 206L4 Product Specifications (2013), S.6, <http://www.indesaviation.com/wp-content/uploads/2014/11/206L4-Spec-Book-22013-Web.pdf> (gelesen am 26.01.2017)

Gesamtkosten der Rotorbaugruppe auf Basis der Ersatzteilpreise beträgt ca. 160.000 Euro.

Für die Systemkosten wurde ein Zielwert von 50.000 Euro festgelegt und für die Bodenstation 10.000 Euro. Hier gilt es im Lauf des ALAADy-Projektfortschrittes genauere Zahlen zu bestimmen und die Berechnung gegebenenfalls nochmals durchzuführen.

Das Ergebnis der Kostenabschätzung unter sehr optimistischen Grundvoraussetzungen beträgt somit 590.000 Euro.

[Bezeichnung]	[Programmkosten]	[Mengenfaktor]	[Basispreis]	[Kosten pro Fluggerät]	[Anteil]
<b>1. Kosten für Struktur, Triebwerk und Propeller</b>				<b>547.606 EURO</b>	<b>93%</b>
<b>1.1. Zertifizierungskosten</b>	8.309.835 EURO			83.098 EURO	14%
1.1.1. Entwicklung	3.587.278 EURO			35.873 EURO	6%
1.1.2. Entwicklungsgemeinkosten	140.424 EURO			1.404 EURO	0%
1.1.3. Flugtests	798.715 EURO			7.987 EURO	1%
1.1.4. Werkzeugbau	3.783.417 EURO			37.834 EURO	6%
<b>1.2. Produktionskosten</b>	18.927.400 EURO			189.274 EURO	32%
<b>1.3. Qualitätskontrolle</b>	1.230.281 EURO			12.303 EURO	2%
<b>1.4. Material</b>	1.532.386 EURO			15.324 EURO	3%
<b>1.5. Triebwerk/-e</b>		0,68	173.972 EURO	117.544 EURO	20%
<b>1.6. Propeller</b>		0,68	24.079 EURO	16.269 EURO	3%
<b>1.7. Rotor</b>		0,71	160.000 EURO	113.794 EURO	19%
<b>2. Kosten für Bodenstation und Systeme</b>				<b>42.673 EURO</b>	<b>7%</b>
<b>2.1. Bodenstation</b>		0,71	10.000 EURO	7.112 EURO	1%
<b>2.2. Systeme</b>		0,71	50.000 EURO	35.561 EURO	6%
<b>Gesamtkosten pro Fluggerät</b>				<b>590.279 EURO</b>	<b>100%</b>

Tabelle 20: Gesamtsystemkosten bei 100 produzierten Einheiten

## Szenario 2 (30 produzierte Stück)

In einem zweiten Kostenabschätzungsbeispiel sollen die Kosten anhand einer konservativeren Abschätzung des Marktpotentials betrachtet werden. Die über einen Zeitraum von fünf Jahren absetzbare Stückzahl wird dafür auf 30 Stück festgesetzt, alle anderen Parameter bleiben unverändert. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 21 angeführten Kosten.

[Bezeichnung]	[Programmkosten]	[Mengenfaktor]	[Basispreis]	[Kosten pro Fluggerät]	[Anteil]
<b>1. Kosten für Struktur, Triebwerk und Propeller</b>				<b>869.157 EURO</b>	<b>95%</b>
<b>1.1. Zertifizierungskosten</b>	6.637.398 EURO			221.247 EURO	24%
1.1.1. Entwicklung	2.877.917 EURO			95.931 EURO	10%
1.1.2. Entwicklungsgemeinkosten	140.424 EURO			4.681 EURO	1%
1.1.3. Flugtests	798.715 EURO			26.624 EURO	3%
1.1.4. Werkzeugbau	2.820.342 EURO			94.011 EURO	10%
<b>1.2. Produktionskosten</b>	10.071.693 EURO			335.723 EURO	37%
<b>1.3. Qualitätskontrolle</b>	654.660 EURO			21.822 EURO	2%
<b>1.4. Material</b>	590.539 EURO			19.685 EURO	2%
<b>1.5. Triebwerk/-e</b>		0,74	173.972 EURO	128.498 EURO	14%
<b>1.6. Propeller</b>		0,74	24.079 EURO	17.785 EURO	2%
<b>1.7. Rotor</b>		0,78	160.000 EURO	124.398 EURO	14%
<b>2. Kosten für Bodenstation und Systeme</b>				<b>46.649 EURO</b>	<b>5%</b>
<b>2.1. Bodenstation</b>		0,78	10.000 EURO	7.775 EURO	1%
<b>2.2. Systeme</b>		0,78	50.000 EURO	38.874 EURO	4%
<b>Gesamtkosten pro Fluggerät</b>				<b>915.806 EURO</b>	<b>100%</b>

Tabelle 21: Gesamtsystemkosten bei 30 produzierten Einheiten

## 6 Anwendung des Kostenmodells

In diesem Kapitel wird die zuvor definierte Kostenabschätzung für konkrete Szenarien angewendet. Dadurch wird einerseits die Anwendbarkeit modellierter Kostenabschätzungen demonstriert und andererseits eine quantitative Abschätzung der Betriebskosten diverser Szenarien vorgenommen.

Für die Anwendung der Kostenabschätzung wird analog zu Kapitel 6 vorgegangen. Einen Überblick über die konkreten Schritte liefert Abbildung 29.

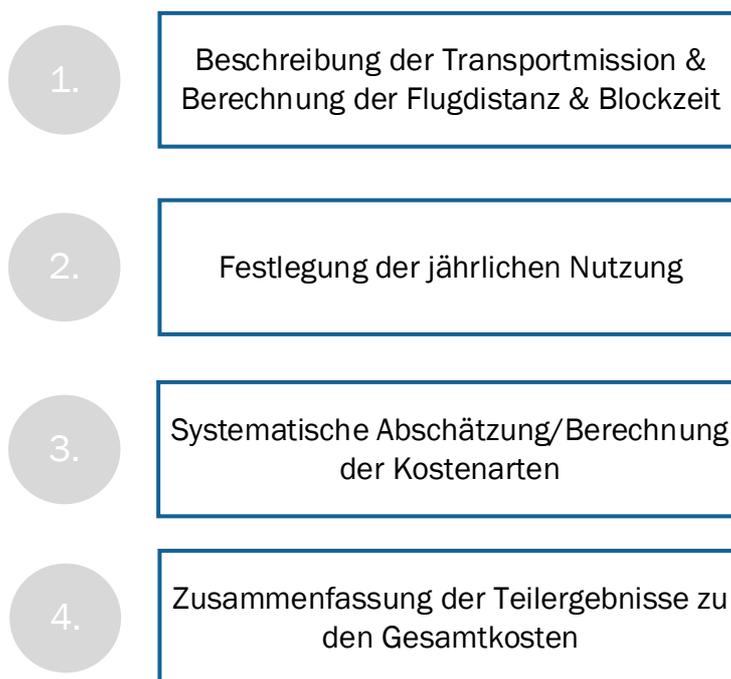


Abbildung 29: Schritte der Kostenabschätzung <sup>172</sup>

<sup>172</sup> Eigene Darstellung

## 6.1 Basis-Szenario

### 6.1.1 Die Transportmission und jährliche Nutzung

Als exemplarische Transportmission dient der Frachttransport zwischen dem Flughafen Frankfurt und einem Distributionslager in Rüdersdorf in der Nähe von Berlin. Diese exemplarische Transportmission wurde aus den folgenden Gründen gewählt:

- Aufgrund der hohen Bedeutung des Flughafens Frankfurt im europäischen Luftfrachtverkehr und Berlin als Metropolregion wird auf dieser Strecke eine entsprechende Nachfrage erwartet.
- Die Flugstrecke entspricht etwa der vorgesehenen Transportdistanz aus dem ALAADy Projekt von ca. 600 Kilometer.
- Die Strecke fällt durch ihre geografische Lage in den Zuständigkeitsbereich der EASA, die in Bezug auf die Regularien eine internationale Vorreiterrolle eingenommen hat.

#### Das Fluggerät

Als Fluggerät kommt die Tragschrauber-Konfiguration aus dem ALAADy-Projekt zum Einsatz. Die vorgesehene Fluggeschwindigkeit beträgt 200 Kilometer pro Stunde.

#### Der Flughafen Frankfurt am Main

Gemessen am Passagieraufkommen, ist der Flughafen Frankfurt am Main der größte Verkehrsflughafen in Deutschland. Mit einem Frachtaufkommen von 2,1 Millionen Tonnen war er zudem 2014 vor Paris, Amsterdam und London der größte Luftfrachtumschlagplatz Europas.<sup>173</sup> Nach Angaben der Betreiberfirma Fraport AG werden am Flughafen Frankfurt fast 50 Prozent des deutschen Luftfrachtaufkommens abgewickelt.<sup>174</sup> Der Flughafen verfügt über vier Landebahnen, drei mit einer Länge von 4.000 Metern und einer mit einer Länge von 2.800 Metern. Für die Frachtabfertigung verfügt der Flughafen über zwei räumlich voneinander getrennte Bereiche, die sogenannte CargoCity Nord und die CargoCity Süd. Die Cargo City Nord ist der Hauptsitz von Lufthansa Cargo und beherbergt zudem unter anderem die Lufthansa Truck Station, das Perishable Center für Frischwaren und die Animal Lounge für den Tiertransport. Die CargoCity Süd ist flächenmäßig deutlich größer als ihr nördliches Pendant. Sie beheimatet eine Vielzahl an Logistikdienstleistern (u.a. DHL Global

---

<sup>173</sup> vgl. Airports Council International: ACI World releases preliminary world airport traffic and rankings (2015), S.4, [www.aci.aero/media/a8de41f1-7054-4443-b259-878e042556e8/9LkYoA/News/Releases/2015/Prelim%202014%20Stats\\_26%20March%202015/ACI%20World\\_2014%20Preliminary%20rankings\\_26%20March%202015\\_PDF.pdf](http://www.aci.aero/media/a8de41f1-7054-4443-b259-878e042556e8/9LkYoA/News/Releases/2015/Prelim%202014%20Stats_26%20March%202015/ACI%20World_2014%20Preliminary%20rankings_26%20March%202015_PDF.pdf) (abgerufen am 02.03.2017)

<sup>174</sup> vgl. Fraport AG: Zahlen Daten Fakten 2015 zum Flughafen Frankfurt (2015), S.12, [www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/presse/publikationen/2015/zahlen--daten--fakten-2015/jcr:content.file/zahlen-daten-fakten-2015.pdf](http://www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/presse/publikationen/2015/zahlen--daten--fakten-2015/jcr:content.file/zahlen-daten-fakten-2015.pdf) (gelesen am 01.02.2017)

Forwarding). Die Gesamtfläche der beiden Cargo-Cities beträgt 149 Hektar, zusätzlich sind 27 Hektar für die zukünftige Erschließung vorgesehen.<sup>175</sup>

### Das Distributionszentrum in Rüdersdorf

Als exemplarisch ausgewähltes Ziel dient das DHL Frachtpostzentrum in Rüdersdorf bei Berlin.



Abbildung 30: DHL Distributionszentrum Rüdersdorf bei Berlin<sup>176</sup>

Das Distributionszentrum übernimmt für DHL die zentrale Verteilfunktion für den Süden und Osten von Berlin, pro Tag werden bis zu 450.000 ein- und ausgehende Pakete bearbeitet.<sup>177</sup> Für das Berechnungsbeispiel wird von einer nordwestlich an das Areal angrenzenden 300 Meter langen Start- und Landebahn ausgegangen. (siehe Abbildung 30).

### Die Flugstrecke

Die Luftlinie zwischen den beiden Standorten beträgt 453 Kilometer. Für die Berücksichtigung des zur Risikominimierung nötigen Umweges wird für den Transport eine Umweg-Faktor von 1,25 vorgesehen. Dadurch soll sowohl der Umweg resultierend aus einer geeigneten Abflugschneise am Flughafen Frankfurt sowie durch gezieltes umfliegen dicht besiedelter Gebiete wie z.B. den Großraum Fulda (siehe Abbildung 31) abgedeckt werden.

<sup>175</sup> vgl. Fraport AG: Zahlen Daten Fakten 2015 zum Flughafen Frankfurt (2015), S.11, [www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/presse/publikationen/2015/zahlen--daten--fakten-2015/jcr:content.file/zahlen-daten-fakten-2015.pdf](http://www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/presse/publikationen/2015/zahlen--daten--fakten-2015/jcr:content.file/zahlen-daten-fakten-2015.pdf) (gelesen am 01.02.2017)

<sup>176</sup> <https://www.google.de/maps> (20.03.2017), ©2017 GeoBasis-DE/BKG

<sup>177</sup> vgl. <http://www.rbb-online.de/wirtschaft/beitrag/2016/12/akkord-arbeit-weihnachten-dhl-paketzentrum-ruedersdorf.html> (gelesen am 05.02.2017)

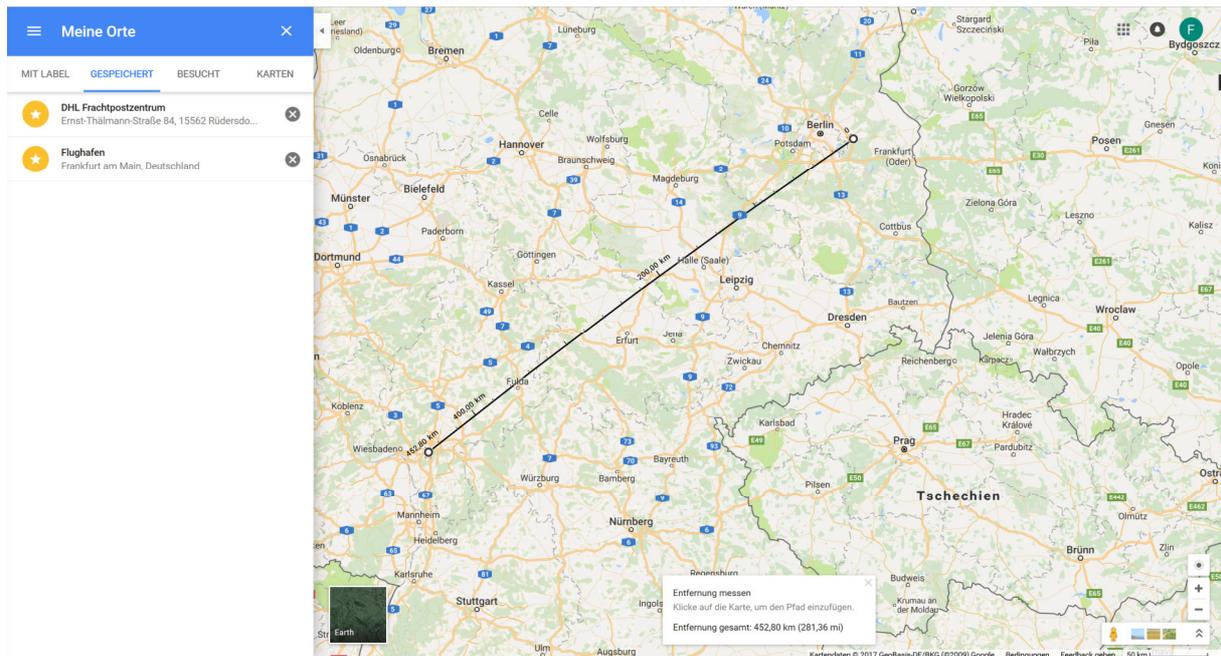


Abbildung 31: Luftlinien Flughafen Frankfurt am Main – Distributionszentrum Rüdersdorf<sup>178</sup>

## Berechnung der Flugdistanz und der Blockzeit

Gemäß den in Kapitel 5.1 festgelegten Formeln zur Beschreibung der Transportmission ergibt sich unter den gemachten Angaben eine Flugdistanz von 570 Kilometern und eine Blockzeit von 3 Stunden.<sup>179</sup>

## Jährliche Nutzung

Für die jährliche Nutzung wird im Basis-Szenario von 2.200 Blockstunden pro Jahr ausgegangen. Dies entspricht einer täglichen Nutzung von ca. 6 Blockstunden bzw. etwa einem Hin- und Rückflug der im vorherigen Kapitel beschriebenen Transportmission pro Tag.

### 6.1.2 Abschätzung nach Kostenarten

#### Abschreibung

In Bezug auf die Abschreibungen wird den Empfehlungen in Kapitel 5.5.1 gefolgt und die Abschreibungsdauer mit 10 Jahren und der Restwert mit 20 Prozent angenommen. Als Abschreibungsbasis werden die in Kapitel 6.9 abgeschätzten Entwicklungs- und Produktionskosten des Fluggerätes herangezogen. Dafür wird von einer absetzbaren Stückzahl von 100 Stück über 5 Jahre ausgegangen.<sup>180</sup> Somit ergibt sich mit den in

<sup>178</sup> <https://www.google.de/maps> (20.03.2017), ©2017 GeoBasis-DE/BKG

<sup>179</sup> Angenommene Zeit f. Taxi am Abflugs- bzw. Ankunftsort: je 5 min

<sup>180</sup> Ob sich diese Absatzmenge als realisierbar erweist ist unter anderem von der Betriebskostenstruktur des Fluggerätes abhängig und bedarf weiterer (Markt-) Untersuchungen, die den Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

Kapitel 6.5.1 angegebenen Formeln und der in Kapitel 6.9.3 abgeschätzten Stückkosten von etwa 590.000 Euro sowie der im vorherigen Kapitel festgelegten jährlichen Nutzung von 2.200 Blockstunden eine jährliche Abschreibung in der Höhe von 47.200 Euro sowie ein Kostensatz von 21,5 Euro pro Blockstunde.

### **Kalkulatorische Zinskosten**

Gemäß der in Kapitel 6.5.2 angegebenen Formeln, sind für die Abschätzung der kalkulatorischen Zinskosten die Abschreibungsbasis, der Restwert und der Zinssatz erforderlich. Für das vorliegende Szenario wird von einer Fremdfinanzierung ausgegangen. Der durchschnittliche Effektivzinssatz für Neukredite an nichtfinanzielle Kapitalgesellschaften mit anfänglicher Zinsbindung und einer Laufzeit von 10 Jahren betrug gemäß der Zinsstatistik der deutschen Bundesbank im Zeitraum Februar 2016 bis Jänner 2017 zwischen ca. 1,3 und 1,9 Prozent.<sup>181</sup> Für die Berechnung wird von einem Zinssatz von 1,6 Prozent ausgegangen. Daraus ergeben sich jährliche Zinskosten in der Höhe von etwa 5.600 Euro und ein Kostensatz von 2,6 Euro pro Blockstunde.

### **Operatorlohnkosten**

Für das vorliegende Szenario wird von einem dezidierten Operator pro Fluggerät ausgegangen. Für die jährliche Nutzung von 2.200 Blockstunden folgt daher ein Bedarf von 1,5 Vollzeitäquivalenten. Die jährlichen Personalkosten für ein Vollzeitäquivalent werden gemäß den erwarteten Anforderungen mit 60.000 Euro abgeschätzt. Daraus ergeben sich Personalkosten von 40,9 Euro pro Blockstunde.

### **Wartungskosten**

Die Wartungskosten des Fluggerätes setzen sich aus den Kosten für die Triebwerksüberholung, die Triebwerkswartung und -inspektion sowie der Wartung der Systeme, Struktur und des Rotors zusammen. Die Kosten der Triebwerksüberholung werden basierend auf der in Kapitel 5.6.1 angeführten Tabelle 11 und der Triebwerksleistung von insgesamt 400 Kilowatt mit einem Kostensatz von 40 Euro pro Blockstunde abgeschätzt. Die Kosten für die Wartung des Rotors werden in Anlehnung an die Wartungskosten des Bell 206 Helikopter-Rotors (siehe Tabelle 10) mit 50 Euro pro Blockstunde abgeschätzt. Für die Kostensätze in Bezug auf die Wartung der Struktur, der laufenden Wartung und Inspektion der Triebwerke und der Wartung der Systeme wird von einem Wert von insgesamt 30 Euro pro Blockstunden ausgegangen. In Summe ergeben sich aus diesen Annahmen daraus Wartungskosten von 120 Euro pro Blockstunde.

---

<sup>181</sup> vgl. Deutsche Bundesbank: Zinsstatistik (2017), S.6, [https://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld\\_Und\\_Kapitalmaerkte/Zinssaetze\\_Renditen/S510ATSUHDE.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld_Und_Kapitalmaerkte/Zinssaetze_Renditen/S510ATSUHDE.pdf?__blob=publicationFile) (abgerufen am 26.03.2017)

## Kalkulatorische Wagniskosten

Die mittlere Ausfallrate wird im Einklang mit der derzeitigen technischen Realisierbarkeit mit 10.000 Stunden abgeschätzt.<sup>182</sup> Ein Ausfall tritt unter dieser Annahme und der geplanten jährlichen Nutzung von 2.200 Stunden demnach im Mittel etwa alle 4,5 Jahre auf. Für das vorliegende Szenario wird von einem erwarteten Schaden in der Höhe eines Viertels der Anschaffungskosten ausgegangen. Daraus resultieren nach den in Kapitel 5.6.2 angegebenen Formel kalkulatorische Wagniskosten in der Höhe von 14,8 Euro pro Blockstunde bzw. jährliche Kosten in der Höhe von 32.450 Euro.

## Treibstoffkosten

Der Treibstoffpreis orientiert sich an dem von Shell für den Flughafen Frankfurt festgelegten Verkaufspreis für die Allgemeine Luftfahrt. Dieser betrug im Jänner 2017 für Jet-A1 804 Euro pro 1000 Liter.<sup>183</sup> Steuern fallen gemäß der derzeitigen Rechtslage nicht an und werden in diesem Szenario daher auch nicht berücksichtigt. Laut den in Kapitel 5.7.1 angeführten Daten wird während einer Flugphase mit einer Nutzlast von 1000 Kilogramm und einer Fluggeschwindigkeit von 200 Kilometer pro Stunde eine Triebwerksleistung von 169 Kilowatt benötigt. In Kombination mit dem spezifischen Verbrauch von 0,32 Kilogramm pro Kilowatt pro Stunde und einem 10 prozentigen Aufschlag für die Taxi-Phase und etwaige Mehrverbräuche, ergibt sich ein Kraftstoffverbrauch von 220,5 Liter und Treibstoffkosten von etwa 177 Euro pro Trip.

## Start- und Landegebühren

Die aktuellen Flughafenentgelte am Flughafen Frankfurt werden in der Entgeltverordnung des Flughafens aufgeführt. Die Start- und Landegebühren setzen sich aus einem masse-, fracht- und lärmbezogenen Entgeltanteil zusammen. Zusätzlich fallen Gebühren für das Abstellen der Fluggeräte in Anhängigkeit von eingenommener Parkfläche und Parkdauer an. Gemäß der derzeitigen Entgeltverordnung beträgt das massenbezogene Start- und Landeentgelt für alle Flugzeuge unter 15.000 Kilogramm jeweils mindestens 226,36 Euro, hinzukommen zudem noch fracht- und lärmbezogene Entgeltanteile.<sup>184</sup> Allerdings muss bedacht werden, dass die derzeit vorhandene Infrastruktur für das betrachtete unbemannte Fluggerät deutlich überdimensioniert ist. Für dieses Berechnungsbeispiel wird daher von einer zusätzlichen ca. 300 Meter langen Start- und Landepiste für Starts und

---

<sup>182</sup> vgl. Kapitel 2.2.4

<sup>183</sup> <http://www.shell.com/business-customers/aviation/ppp/our-posted-airfield-prices.html> (gelesen am 27.01.2017)

<sup>184</sup> vgl. Fraport AG: Flughafenentgelte (2015), S.5ff, [www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/kompetenzen/aviation-services/flug--und-terminalbetrieb/flughafenentgelte-2015/jcr:content.file/entgelte-charges-4-2016-4c.pdf](http://www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/kompetenzen/aviation-services/flug--und-terminalbetrieb/flughafenentgelte-2015/jcr:content.file/entgelte-charges-4-2016-4c.pdf) (abgerufen am 02.03.2017)

Landungen von unbemannten Fluggeräten, die z.B. im Bereich der CargoCity Süd entstehen könnte, ausgegangen. Entsprechend der reduzierten Anforderungen an die Infrastruktur wird mit einer fiktiven Startgebühr in der Höhe von 50 Euro gerechnet. Dieser Wert orientiert sich an den Start- und Landegebühren des nahegelegenen wesentlich kleineren Verkehrslandeplatz Frankfurt - Engelbach.<sup>185</sup> Die für die Berechnung angenommenen Landegebühren am Zielort wird mit 20 Euro abgeschätzt und orientieren sich an der Gebührenverordnung des nahegelegenen Verkehrslandeplatz Eggersdorf.<sup>186</sup>

### **Datenübertragung**

In diesem Berechnungsbeispiel wird davon ausgegangen, dass zwischen Bodenstation und Fluggerät eine permanente Verbindung herrscht. Der Kommunikationslink ist redundant ausgeführt und besteht aus einem Modul zur terrestrischen Kommunikation und einem Modul zur satellitengestützten Kommunikation. Die Übertragung eines Videosignales ist nur während kritischen Situationen erforderlich und erfolgt nur während 10 Prozent der Blockzeit. Demnach ist während 90 Prozent der Blockzeit eine Übertragungsrate von 30 kbit pro Sekunde und während 10 Prozent der Blockzeit eine Übertragungsrate von 300 kbit pro Sekunde erforderlich. Für die Kosten der Übertragungstechnologien wird von 0,001 Euro pro Megabyte bei Übertragung im Mobilfunknetz und 1 Euro pro Megabyte bei Übertragung per Satellit ausgegangen.<sup>187</sup> Aufgrund der topografischen Gegebenheiten wird davon ausgegangen, dass die Kommunikation zu 90 Prozent terrestrisch und 10 Prozent satellitengestützt erfolgt. Daraus resultieren Kosten in der Höhe von 2,6 Euro pro Blockstunde.

### **6.1.3 Ergebnisse und Interpretation**

Zusammenfassend ergeben sich aus den zuvor genannten Teilkosten die in Tabelle 22 und in Abbildung 32 dargestellten Gesamtkosten in der Höhe von ca. 854 Euro für die exemplarische Transportmission. Es gilt zu beachten, dass diese Werte nur für die in den vorherigen Kapiteln dargelegten Rahmenbedingungen Gültigkeit besitzen und nur den Hinflug beinhalten.

---

<sup>185</sup> vgl. Frankfurt Engelsbach Airport: Gebührenordnung für den Verkehrslandeplatz Frankfurt Engelsbach (2016), S.4, [http://www.egelsbach-airport.com/\\_downloads/de/EDFE\\_Gebuehrenordnung\\_2016.pdf](http://www.egelsbach-airport.com/_downloads/de/EDFE_Gebuehrenordnung_2016.pdf) (abgerufen am 03.03.2017)

<sup>186</sup> vgl. Verkehrslandeplatz Eggersdorf: Verkehrslandeplatz Eggersdorf – Gebühren (2017), S.1, <http://www.flugplatz-eggersdorf.de/images/preisliste.pdf> (abgerufen am 02.05.2017)

<sup>187</sup> vgl. Kapitel 5.7.3

Kostenart	Kostenkategorisierung	Kostensatz	Kosten d. Mission	Anteil
Abschreibung	Fixe Gemeinkosten	21,5 Euro	64,3 Euro	8%
Kalkulatorische Zinsen	Fixe Gemeinkosten	2,6 Euro	7,7 Euro	1%
Operatorlohnkosten	Fixe Gemeinkosten	40,9 Euro	122,6 Euro	14%
Wartungskosten	Variable Gemeinkosten	120,0 Euro	359,8 Euro	42%
Wagniskosten	Variable Gemeinkosten	14,8 Euro	44,2 Euro	5%
Datenübertragung	Einzelkosten	2,6 Euro	7,9 Euro	1%
Treibstoffkosten	Einzelkosten	-	177,3 Euro	21%
Start- und Landegebühren	Einzelkosten	-	70,0 Euro	8%
<b>Gesamtkosten der Transportmission</b>			<b>854 Euro</b>	<b>100%</b>

Tabelle 22: Geschätzte Gesamtkosten der Transportmission im Basis-Szenario

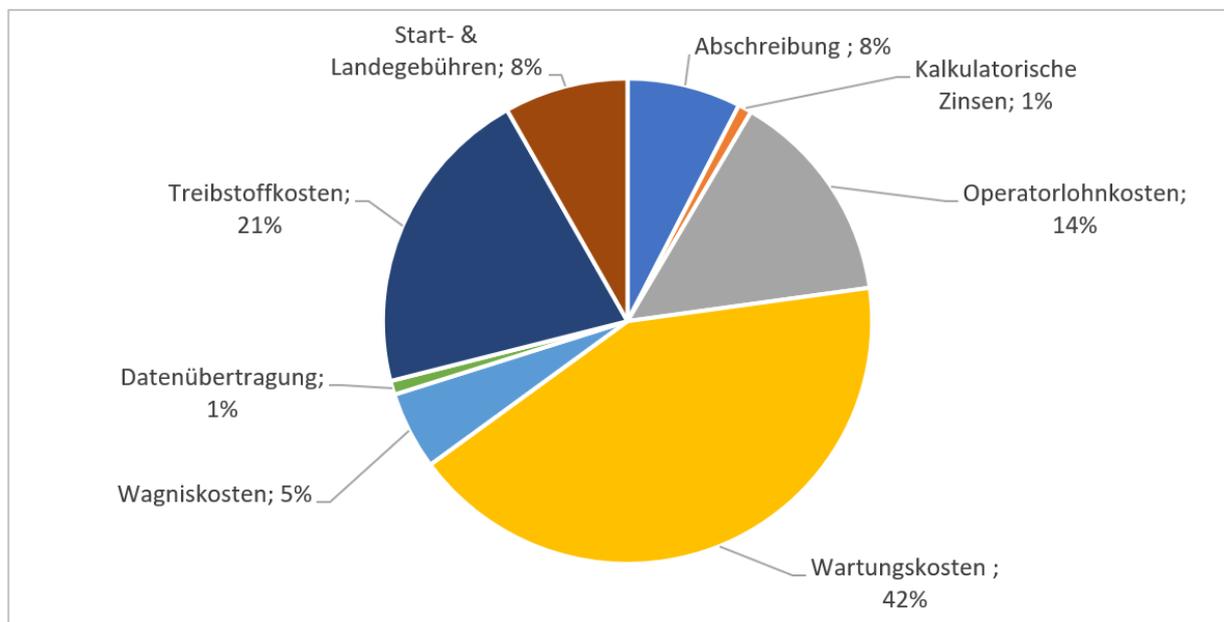


Abbildung 32: Kostenstruktur im Basis-Szenarios

## 6.2 Best-Case-Szenario

Die vorigen Kapitel haben eine erste beispielhafte Abschätzung der Transportkosten unter definierten Rahmenbedingungen ermöglicht und gleichzeitig aufgezeigt, dass eine Vielzahl an Einflussfaktoren direkte Auswirkungen auf die Kostenstruktur haben. In diesem Kapitel sollen die Gesamtkosten für die gleiche Transportmission unter optimalen Rahmenbedingungen, also zu minimalen Kosten, betrachtet werden. Diese Rahmenbedingungen werden im Folgenden als „Best-Case-Szenario“ bezeichnet.

Zur Minimierung der Kosten gibt es zwei wesentliche Möglichkeiten:

1. Senkung der Kosten auf Kostenartenebene
2. Erhöhung der jährlichen Nutzung und damit Senkung der Fixkostensätze

Daher werden im Vergleich zum Basis-Szenario folgende Änderungen bzgl. der Annahmen vorgenommen:

- Es wird von einer, für ein Fluggerät sehr hohen, Nutzung von 12 Stunden pro Tag bzw. 4.380 Stunden pro Jahr ausgegangen.
- Das Fluggerät fliegt vollkommen autonom, es ist kein Operator nötig.
- Der Treibstoff kann zu deutlich besseren Konditionen bezogen werden, es wird daher von nur 0,5 Euro pro Liter ausgegangen.<sup>188</sup>
- Bei einem Ausfall kommt es zu keinem Schaden.
- Eine Datenübertragung zur Bodenstation ist nicht nötig.

Daraus resultiert die in Tabelle 23 und in Abbildung 33 angeführte Abschätzung der Kostenstruktur. Die Gesamtkosten sind im Vergleich zum Basis Szenario um etwa 278 Euro auf etwa 576 Euro gesunken.

Kostenart	Kostenkategorisierung	Kostensatz	Kosten d. Mission	Anteil
<b>Abschreibung</b>	Fixe Gemeinkosten	10,8 Euro	32,3 Euro	6%
<b>Kalkulatorische Zinsen</b>	Fixe Gemeinkosten	1,3 Euro	3,9 Euro	1%
<b>Operatorlohnkosten</b>	Fixe Gemeinkosten	0,0 Euro	0,0 Euro	0%
<b>Wartungskosten</b>	Variable Gemeinkosten	120,0 Euro	359,8 Euro	62%
<b>Wagniskosten</b>	Variable Gemeinkosten	0,0 Euro	0,0 Euro	0%
<b>Datenübertragung</b>	Einzelkosten	0,0 Euro	0,0 Euro	0%
<b>Treibstoffkosten</b>	Einzelkosten	-	110,3 Euro	19%
<b>Start- und Landgebühren</b>	Einzelkosten	-	70,0 Euro	12%
<b>Gesamtkosten der Transportmission</b>			<b>576 Euro</b>	<b>100%</b>

**Tabelle 23: Geschätzte Gesamtkosten der Transportmission im Best-Case-Szenario**

<sup>188</sup> vgl. Kapitel 2.4.2

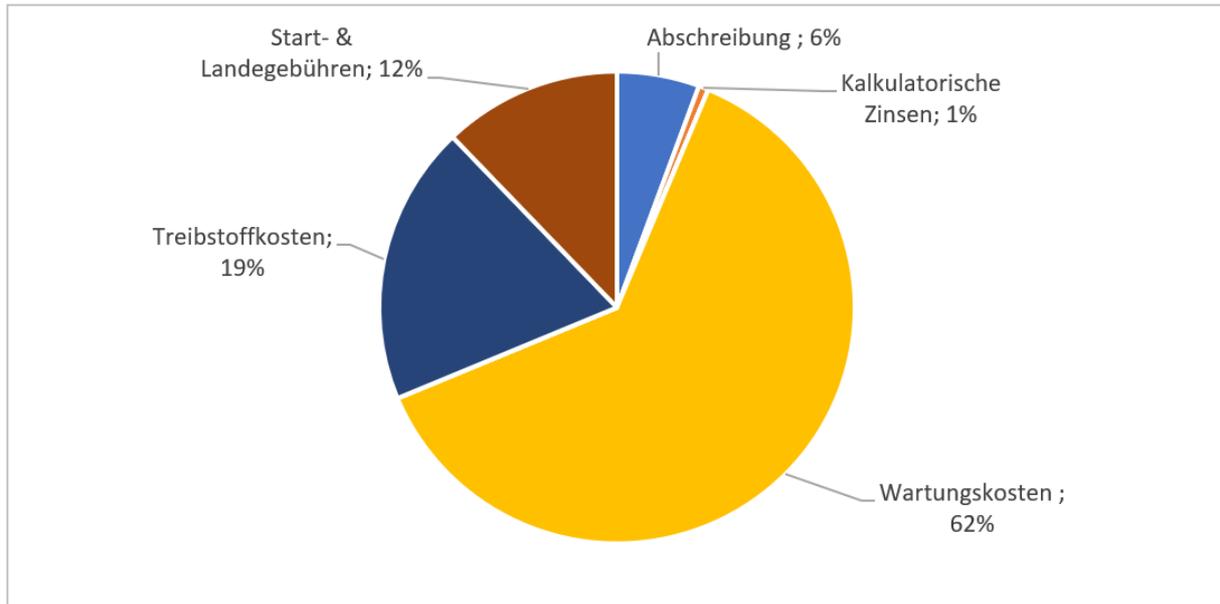


Abbildung 33: Kostenstruktur im Best-Case-Szenario

### 6.3 Worst-Case-Szenario

In diesem Kapitel sollen die Gesamtkosten für die in Kapitel 7.1.1 definierte Transportmission unter „den ungünstigsten Rahmenbedingungen“ betrachtet werden. Diese Rahmenbedingungen werden im Folgenden als „Worst-Case-Szenario“ bezeichnet.

Im Vergleich zum Basis-Szenario werden dazu folgende Änderungen bzgl. der Annahmen vorgenommen:

- Es wird von einer Nutzung von 1 Stunden pro Tag bzw. 365 Stunden pro Jahr ausgegangen.<sup>189</sup>
- Es wird von einer produzierten Stückzahl von 30 Stück in 5 Jahren und damit von Stückkosten in der Höhe von etwa 915.000 Euro ausgegangen.
- Aufgrund der geringeren Nutzung ist nur noch ein Vollzeitäquivalent für die Überwachung und Steuerung des Fluggerätes nötig
- Bei einem Ausfall tritt eine Schadenshöhe im Ausmaß der Stückkosten auf
- Die Datenübertragung erfolgt durchgängig per Satellit

Daraus resultiert die in Tabelle 24 und in Abbildung 34 angeführte Abschätzung der Kostenstruktur. Die Gesamtkosten sind im Vergleich zum Basis-Szenario deutlich höher.

<sup>189</sup> Dies entspricht etwa der durchschnittlichen Nutzung der FedEx Feeder Cessna 208 Flotte im Jahr 2009, siehe Kapitel 2.3

Kostenart	Kostenkategorisierung	Kostensatz	Kosten d. Mission	Anteil
Abschreibung	Fixe Gemeinkosten	200,5 Euro	601,2 Euro	28%
Kalkulatorische Zinsen	Fixe Gemeinkosten	24,1 Euro	72,1 Euro	3%
Operatorlohnkosten	Fixe Gemeinkosten	164,4 Euro	492,8 Euro	23%
Wartungskosten	Variable Gemeinkosten	120,0 Euro	359,8 Euro	17%
Wagniskosten	Variable Gemeinkosten	91,5 Euro	274,3 Euro	13%
Datenübertragung	Einzelkosten	26,1 Euro	78,2 Euro	4%
Treibstoffkosten	Einzelkosten	-	177,3 Euro	8%
Start- und Landegebühren	Einzelkosten	-	70,0 Euro	3%
<b>Gesamtkosten der Transportmission</b>			<b>2126 Euro</b>	<b>100%</b>

Tabelle 24: Geschätzte Gesamtkosten der Transportmission im Worst-Case-Szenario

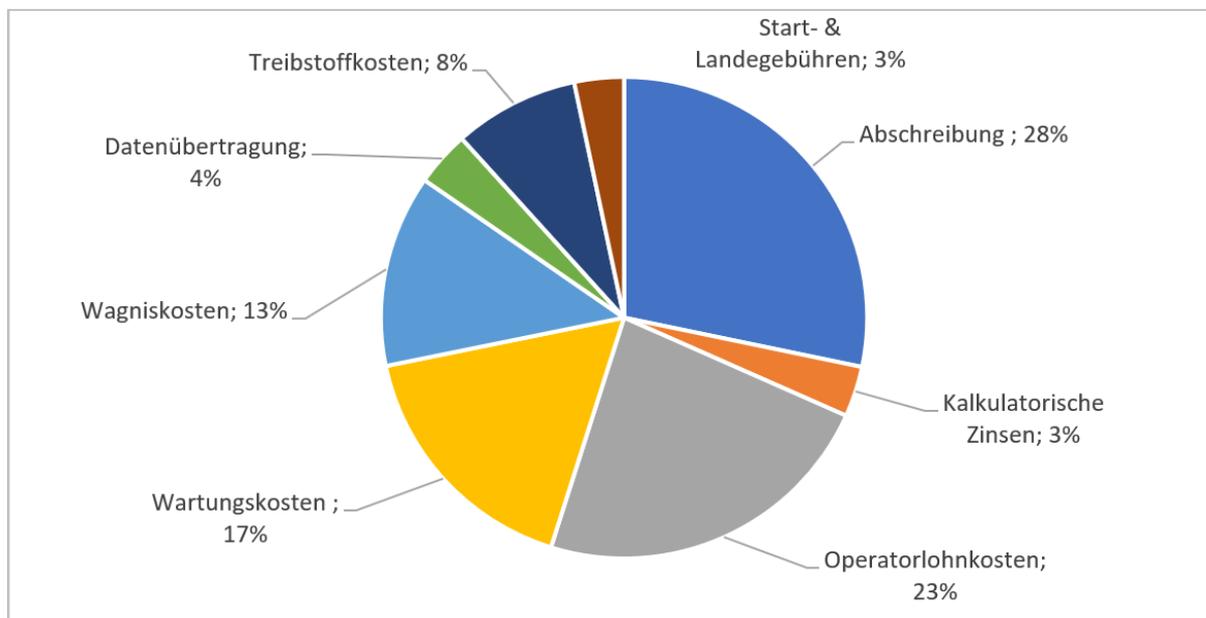


Abbildung 34: Kostenstruktur im Worst-Case-Szenario

## 6.4 Transportalternativen: Straßentransport

### Die Transportstrecke

Die Distanz der Straßenverbindung, über die Autobahnen A4, A5, A9 und A10 beträgt 581 Kilometer. Die geschätzte Fahrzeit für einen PKW beträgt zwischen 4 Stunden 40 Minuten und 6 Stunden 30 Minuten.<sup>190</sup> In der nachfolgenden Betrachtung wird auf Basis der mittleren geschätzten Fahrzeit und einer Pausenzeit von 25 Minuten von einer Transportzeit von 6 Stunden ausgegangen. Für den Transport per LKW gelten Lenk- und Ruhezeiten, alle 4,5 Stunden muss der Fahrer eine 45-minütige Pause einlegen. Die reine Fahrzeit wird auf Basis einer geschätzten durchschnittlichen

<sup>190</sup> vgl. <https://www.google.de/maps/> (gelesen am 27.01.2017)

Geschwindigkeit von 70 Kilometer pro Stunde mit etwa 8 Stunden und 15 Minuten bemessen. In Summe beträgt die Transportdauer für den Transport per LKW demnach etwa 9 Stunden.

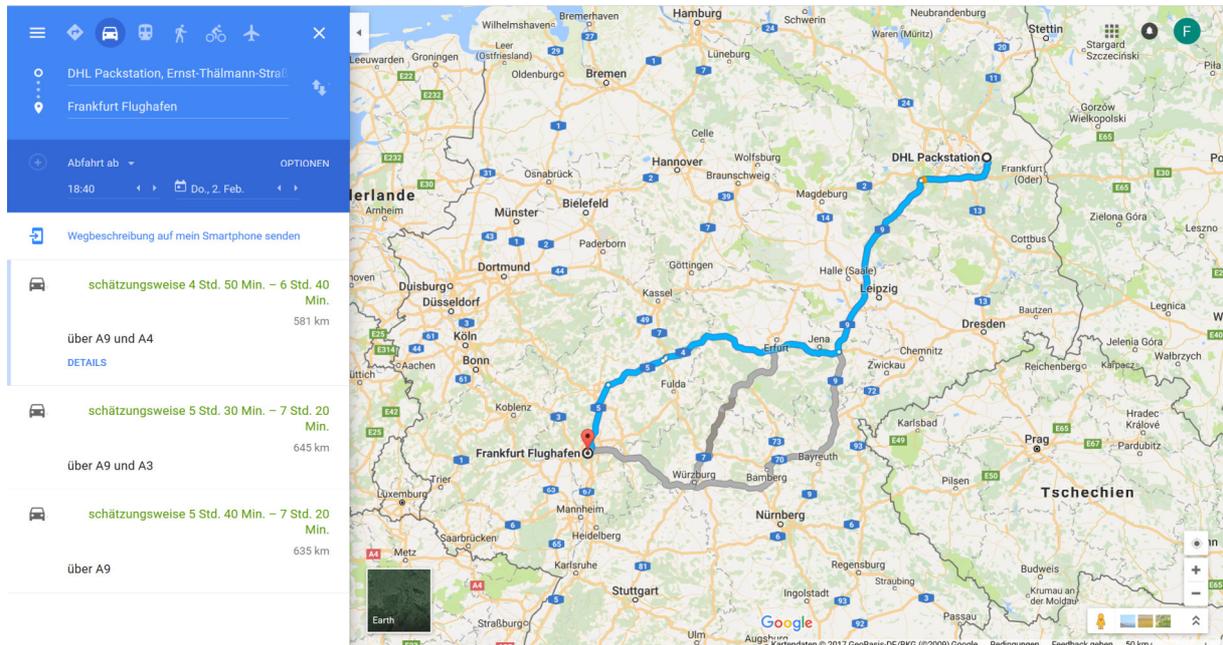


Abbildung 35: Straßenverbindung<sup>191</sup>

## Das Transportmittel

Als Transportmittel werden 3 verschiedene Straßenfahrzeuge herangezogen:

1. Ein Transporter mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von 3,5 Tonnen
2. Ein LKW mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von 7,5 Tonnen
3. Ein Sattelzug

Die Berechnung der Transportkosten dieser erfolgt auf Basis einer von Prof. Dr. Wittenbrink entworfenen zweistufigen Berechnungsmethodik. Diese basierend auf einem Stunden- und einem Kilometersatz. Die beiden Kalkulationssätze betragen 22 Euro pro Stunde und 0,30 Euro pro Kilometer für den LKW mit 7,5 Tonnen und basieren auf folgenden Annahmen:<sup>192</sup>

- Neupreis: 50.000 Euro
- Nutzungsdauer: 5 Jahre
- Kraftstoffpreis: 1,12 Euro pro Liter
- Kraftstoffverbrauch: 15 Liter pro 100 Kilometer
- Lohnkosten Fahrer: 29.000 Euro.

<sup>191</sup> <https://www.google.de/maps> (20.03.2017), ©2017 GeoBasis-DE/BKG

<sup>192</sup> vgl. Wittenbrink, Paul (2014), S.129ff

Eine vollständige Auflistung der Kostensätze für alle drei Transportmittel kann Tabelle 25 entnommen werden.

	EURO 6 Sattelzug	LKW 7,5 t	Transporter 3,5 t
Nutzlast	26,8 t	4 t	1,3 t
Stundensatz	30 EURO	22 EURO	16 EURO
Kilometersatz	0,53 EURO	0,30 EURO	0,20 EURO
Maut	0,155 EURO	-	-

**Tabelle 25: Kostensätze und resultierende Transportkosten<sup>193</sup>**

Auf Basis dieser Berechnungsmethodik ergeben sich unter Berücksichtigung der Transportstrecke und Transportdauer die in Tabelle 26 dargestellten Transportkosten.

	EURO 6 Sattelzug 26,8 t	LKW 7,5 t	Transporter 3,5 t
Transportkosten gesamt	668 EURO	306 EURO	212 EURO
Transportkosten je Tonne	25 EURO	77 EURO	163 EURO

**Tabelle 26: Transportkosten**

<sup>193</sup> vgl. Wittenbrink, Paul (2011), S.58ff

## 6.5 Gegenüberstellung der Transportkosten

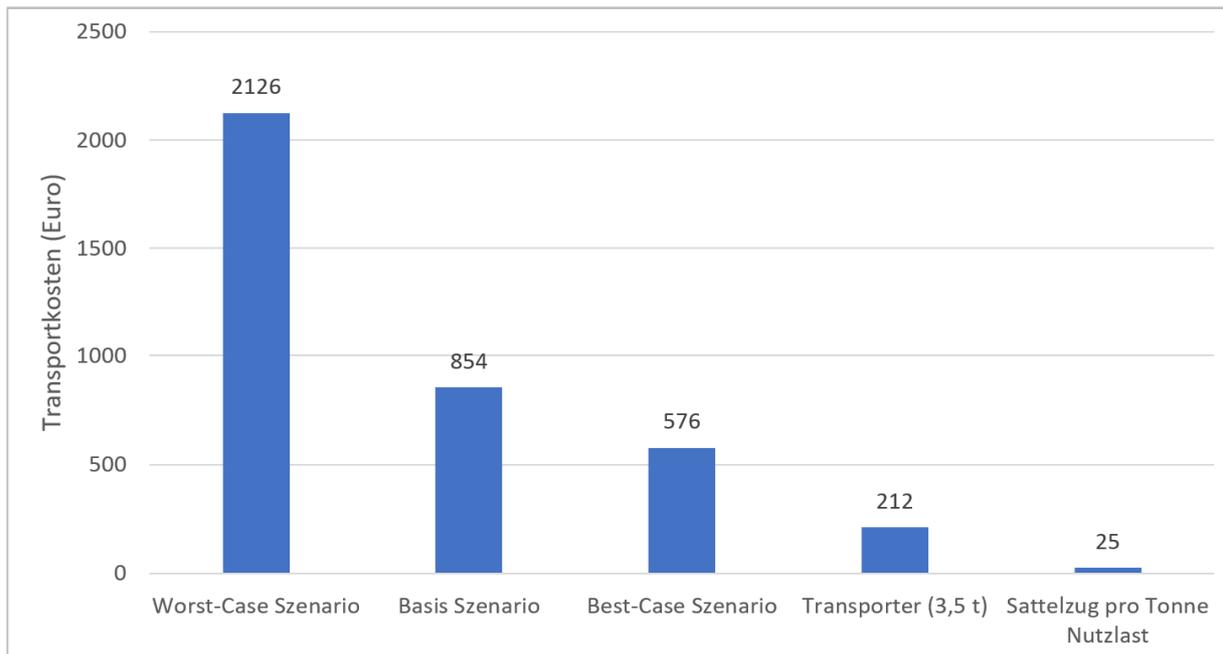


Abbildung 36: Kostenstruktur im Worst-Case-Szenario

Eine Gegenüberstellung in den vorherigen Kapiteln errechneten Kosten zeigt zwei wesentliche Merkmale auf.

1. Der Unterschied zwischen Basis, Best- und Worst- Case ist erheblich
2. Der Unterschied der Szenarien zu den straßengebundenen Transportmitteln ist ebenfalls erheblich.

## 7 Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte erstmal ein Kostenmodell für ein unbemanntes Fluggerät erarbeitet werden, welches die wesentlichen Aspekte:

- Luftfrachtmarkt
- Technische Faktoren
- Regulatorische Rahmenbedingungen

bereits inkrementell während der Erstellung berücksichtigt. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass im Sinne der Kostenträgerstückrechnung das Modellierungsziel entsprechend der Marktnachfrage passend gewählt werden konnte. Somit wurde erstmal ein Kostenmodell dieser Art erstellt. Während der Stand der Wissenschaft durch die Einbeziehung aller bekannten Kostenmodelle, mit angrenzten Modellierungszielen bzw. Modellierungsumfängen, voll miteinbezogen werden konnte. Durch diesen Umstand konnten nicht nur die Kosten anhand konkreter Anwendungsfälle abgeschätzt werden, vielmehr konnte ein Netz an Zusammenhängen zwischen Marktfaktoren, technischen Faktoren und den regulatorischen Rahmenbedingungen gesponnen werden.

Dadurch konnte erfolgreich die Basis zur Beantwortung einer Vielzahl von Fragen gelegt werden:

- Zu welchem kostendeckenden Preis kann eine Transportdienstleistung bei gegebener Nachfrage und Rahmenbedingungen angeboten werden? (Preisfindung)
- Welche Nachfrage (Fluggeräte, Transportdienstleistung) ist erforderlich, um die Transportdienstleistung zu einem gewünschten Preis anbieten zu können?
- Ist die Transportdienstleistung gegenüber Transportalternativen, wie zum Beispiel dem Warentransport per LKW, konkurrenzfähig?
- Welche Auswirkungen haben technologische und konzeptionelle Entscheidungen auf die Kosten? Insbesondere unter dem Aspekt unterschiedlicher jährlicher Nutzung (Auslastung) des Fluggerätes.

In Kapitel 6 konnte für drei konkrete Szenarien erstmal eine quantitative Kostenabschätzung durchgeführt werden. Die große Bandbreite der Ergebnisse der drei Szenarien zeigt gleichzeitig das größte Problem der Kostenabschätzung zum derzeitigen Zeitpunkt: Die relativ hohe Anzahl der undefinierten Rahmenbedingungen lässt eine quantitative Kostenabschätzung nur unter einer Vielzahl von Annahmen zu. In diesem Zusammenhang wird insbesondere darauf verwiesen, dass selbst die Entwicklungs- und Produktionskosten des Fluggerätes von einer Vielzahl verschiedener Faktoren abhängen und für diese Arbeit abgeschätzt werden mussten

(siehe Kapitel 5.8). Der Vergleich mit den straßengebundenen Transportmitteln hat gezeigt, dass die Transportkosten, auch im „Best-Case-Szenario“, höher sind. Im Vergleich mit einem voll beladenen Sattelzug sind die geschätzten Transportkosten pro Tonne mehr als 20-mal höher. Dies lässt allgemein ein sehr schwieriges wirtschaftliches Umfeld erwarten und lässt an der für das „Best-Case-Szenario“ nötigen Nachfrage zweifeln. Diese Einschätzung wird insbesondere durch die in Kapitel 2.3 dargelegte Marktrecherche untermauert. Aus ökologischer Sicht ist des Weiteren der hohe Kraftstoffverbrauch nachteilig. Zentrale Vorteil ist die geringere Transportdauer zwischen Start- und Landepunkt, der sich bei entsprechend kurzem Vor- und Nachlauf in einer geringeren Gesamttransportdauer niederschlägt. Zudem haben sich während der Ausarbeitung der fachlichen Grundlagen einige unerwartete Erkenntnisse ergeben. Hier ist insbesondere auf das Einzugsgebiet der Flughäfen für Luftfracht mit einem Radius von 800 Kilometern sowie den sehr großen Unterschieden des Treibstoffpreises an den einzelnen Flughäfen bzw. Flugplätzen zu verweisen.

## 7.1 Ausblick und mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

Mit der vorliegenden Kostenabschätzung wurde die Grundlage für weitere Kostenbetrachtungen geschaffen. Die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung ergeben sich wie folgt:

Die vorliegende Arbeit bietet insbesondere eine Basis für eine **detaillierte Marktanalyse** auf Basis der in dieser Arbeit abgeschätzten Kosten und in weiterer Folge als Modellinput für zukünftige Kostenabschätzungen.

Die **Optimierung der einzelnen Kostenfunktionen** auf Basis neuer technischer, regulatorischer sowie wirtschaftlicher Erkenntnisse bietet Potential, um die Genauigkeit der Kostenmodellierung weiter zu erhöhen. Unter diesen Punkt sind u.a. folgende zukünftige Verbesserungen denkbar:

- **Einbezug zukünftiger rechtlicher Rahmenbestimmungen** der EASA
- Technologie bzw. Komponenten-spezifische **Optimierung/Detailierung der Wartungskostenfunktion(en)** basierend auf Erfahrungswerten gemäß detaillierten Studien zu den erwarteten Kosten.
- Optimierte Abschätzung der **Anschaffungskosten** auf Basis neuer Erkenntnisse und/oder Prognoseverfahren über die Herstellkosten
- Optimierung/Detailierung der **kalkulatorischen Abschreibung und Zinsen**, auf Basis neuer Erkenntnisse, insbesondere in Bezug auf die Anschaffungskosten

Neben der Optimierung der Kostenfunktionen soll auch die **Erweiterung des Modells um weitere Kostenfunktionen** nicht außer Acht gelassen werden. Dies ist insbesondere relevant, wenn dies wiederum durch neue technische, regulatorische oder wirtschaftliche Rahmenbedingungen bzw. Erkenntnisse erforderlich ist.

Die vorliegende Arbeit kann somit als Fundament der Kostenmodellierung betrachtet werden. Basierend auf diesem Fundament können zukünftige Erkenntnisse systematisch und transparent in das Kostenmodell eingearbeitet und so die Modellierungsgenauigkeit als auch die Anwendbarkeit auf ein spezifisches Problem weiter erhöht werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- **Airports Council International (Hg.):** ACI World releases preliminary world airport traffic and rankings for 2014, [www.aci.aero/media/a8de41f1-7054-4443-b259-878e042556e8/9LkYoA/News/Releases/2015/Prelim%202014%20Stats\\_26%20March%202015/ACI%20World\\_2014%20Preliminary%20rankings\\_26%20March%202015\\_PDF.pdf](http://www.aci.aero/media/a8de41f1-7054-4443-b259-878e042556e8/9LkYoA/News/Releases/2015/Prelim%202014%20Stats_26%20March%202015/ACI%20World_2014%20Preliminary%20rankings_26%20March%202015_PDF.pdf), 2015
- **Ameriflight (Hg.):** A Brief Summary, <https://w3.ameriflight.com/wp-content/uploads/2015/10/Ameriflight-Who-We-Are-What-We-Do.pdf>, 2016
- **Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K.:** Handbuch Logistik, 3., neu bearbeitet Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008
- **Austro Engine (Hg.):** AE300 Technical Data Sheet, [http://austroengine.at/uploads/pdf/mod\\_products1/AE300\\_Technical\\_Data\\_Sheet.pdf](http://austroengine.at/uploads/pdf/mod_products1/AE300_Technical_Data_Sheet.pdf), o.J.
- **Aviation Week Network (Hg.):** Operations Planning Guide, <http://aviationweek.com/datasheet/2016-bca-operations-planning-guide-production-aircraft>, 2016
- **Bernecker, T.; Grandjot, H.:** Leitfaden Luftfracht, HUSS-VERLAG, München, 2012
- **Bell Helicopter (Hg.):** Bell 206L4 Product Specifications, <http://www.indesaviation.com/wp-content/uploads/2014/11/206L4-Spec-Book-22013-Web.pdf>, 2013
- **Boeing (Hg.):** World Air Cargo Forecast 2016-2017, [www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/cargo-market-detail-wacf/download-report/assets/pdfs/wacf.pdf), 2016
- **Boren, H. E.:** DAPCA: A COMPUTER PROGRAM FOR DETERMINING AIRCRAFT DEVELOPMENT AND PRODUCTION COSTS, [www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_memoranda/2006/RM5221.pdf](http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2006/RM5221.pdf), 1967

- **Bukold, S.:** Rekordpreise an den Tankstellen, Allein durch steigende Rohölpreise und schwachen Euro erklärbar?, [https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag\\_de/themen\\_az/verkehr/PDF/benzinpreisstudie.pdf](https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/verkehr/PDF/benzinpreisstudie.pdf), 2012
- **Clausen, U.; Geiger, C.:** Verkehrs- und Transportlogistik, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013
- **Conklin & de Decker Aviation Information (Hg.):** Aircraft Cost Summary 2012, Vol II, <http://questaircraft.com/wp-content/uploads/2012/04/ConklinCostSummary.pdf>, 2012
- **Continental Motors (Hg.):** Continental Motors CD-100 series, [http://www.continentalmotors.aero/uploadedFiles/Content/xImages/spec\\_CD-100%20series-WEB.pdf](http://www.continentalmotors.aero/uploadedFiles/Content/xImages/spec_CD-100%20series-WEB.pdf), o.J.
- **Dauer, J.:** ALAADy, Automated Low Altitude Air DeliverY, Projektplan, DLR, Hamburg, 2015
- **Deimel, K.; Isemann R.; Müller S.:** Kosten- und Erlösrechnung, Grundlagen, Managementaspekte und Integrationsmöglichkeiten der IFRS, Pearson, München, Boston, 2006
- **Deutsche Bundesbank (Hg.):** Zinsstatistik, [https://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld\\_Und\\_Kapitalmaerkte/Zinssaetze\\_Renditen/S510ATSUHDE.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld_Und_Kapitalmaerkte/Zinssaetze_Renditen/S510ATSUHDE.pdf?__blob=publicationFile), 2017
- **Dodel, H.; Eberle, S.:** Satellitenkommunikation, 2., korrigierte und erweiterte Auflage, Springer, Berlin, 2017
- **EASA (Hg.):** 'Prototype' Commission Regulation on Unmanned Aircraft Operations, <https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/UAS%20Prototype%20Regulation%20final.pdf>, 2016
- **Eastlake, C.; Blackwell, H.:** Cost Estimating Software for General Aviation Aircraft Design, <https://peer.asee.org/cost-estimating-software-for-general-aviation-aircraft-design.pdf>, o.J.

- **Europäische Kommission (Hg.):** COMMISSION DECISION of 17/12/2008 declaring a concentration to be compatible with the common market and the functioning of the EEA Agreement, [http://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m5141\\_20081217\\_20682\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m5141_20081217_20682_en.pdf), 2008
- **Europäische Kommission (Hg.):** Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluffahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates, [http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:da8dfec1-9ce9-11e5-8781-01aa75ed71a1.0006.02/DOC\\_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:da8dfec1-9ce9-11e5-8781-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_1&format=PDF), 2015
- **Europäische Kommission (Hg.):** Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the review of the wholesale roaming market, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016SC0200&from=EN>, 2016
- **Frankfurt Engelsbach Airport (Hg.):** Gebührenordnung für den Verkehrslandeplatz Frankfurt – Egelsbach, [http://www.egelsbach-airport.com/\\_downloads/de/EDFE\\_Gebuehrenordnung\\_2016.pdf](http://www.egelsbach-airport.com/_downloads/de/EDFE_Gebuehrenordnung_2016.pdf)., 2016
- **Fraport AG (Hg.):** Flughafenentgelte / Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdienst-Infrastruktureinrichtungen, [www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/kompetenzen/aviation-services/flug--und-terminalbetrieb/flughafenentgelte-2015/jcr:content.file/entgelte-charges-4-2016-4c.pdf](http://www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/kompetenzen/aviation-services/flug--und-terminalbetrieb/flughafenentgelte-2015/jcr:content.file/entgelte-charges-4-2016-4c.pdf), 2015
- **Fraport AG (Hg.):** Zahlen, Daten, Fakten 2015 zum Flughafen Frankfurt, [www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/presse/publikationen/2015/zahlen--daten--fakten-2015/jcr:content.file/zahlen-daten-fakten-2015.pdf](http://www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/presse/publikationen/2015/zahlen--daten--fakten-2015/jcr:content.file/zahlen-daten-fakten-2015.pdf), 2015
- **Freidank, C.:** Kostenrechnung, 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, Wien, Oldenbourg, 1997
- **Fürstenau, B.:** Concept Maps im Lehr-Lern-Kontext, [www.diezeitschrift.de/12011/lehr-lernforschung-01.pdf](http://www.diezeitschrift.de/12011/lehr-lernforschung-01.pdf), 2016

- **General Atomics Aeronautical Systems, Inc. (Hg.):** THE SKY'S [NOT] THE LIMIT General Atomics Aeronautical Continues to Push RPAS Boundaries, [www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft\\_systems/pdf/capability\\_profile.pdf](http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft_systems/pdf/capability_profile.pdf), 2015
- **General Atomics Aeronautical Systems, Inc. (Hg.):** Predator XP, [www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft\\_systems/pdf/PredatorXP021915.pdf](http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft_systems/pdf/PredatorXP021915.pdf), 2015
- **General Atomics Aeronautical Systems, Inc. (Hg.):** Predator B, [www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft\\_systems/pdf/Predator\\_B021915.pdf](http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft_systems/pdf/Predator_B021915.pdf), 2015
- **General Atomics Aeronautical Systems, Inc. (Hg.):** Multi-Role – Single Solution, [http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft\\_systems/pdf/MQ-9B-Capability-Profile-II.pdf](http://www.ga-asi.com/Websites/gaasi/images/products/aircraft_systems/pdf/MQ-9B-Capability-Profile-II.pdf), 2017
- **General Aviation Manufacturers Association (Hg.):** General Aviation Statistical Databook & 2015 Industry Outlook [http://gama.aero/wp-content/uploads/GAMA\\_2014\\_Databook\\_LRes-LowRes.pdf](http://gama.aero/wp-content/uploads/GAMA_2014_Databook_LRes-LowRes.pdf), 2014
- **Gudmundsson, S.:** General Aviation Aircraft Design, Applied Methods and Procedures, Elsevier, Oxford, 2014
- **Hering, E.:** Kostenrechnung und Kostenmanagement für Ingenieure, Springer, Wiesbaden, 2015
- **Honeywell (Hg.):** TPE331-10 Turboprop Engine, [https://aerocontent.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/BA\\_brochures-documents/TPE331.10.pdf](https://aerocontent.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/BA_brochures-documents/TPE331.10.pdf), 2016
- **Hess, R. W.; Romanoff, H. P.:** Aircraft Airframe Cost Estimating Relationship: All Mission Types, [www.rand.org/content/dam/rand/pubs/notes/2005/N2283.1.pdf](http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/notes/2005/N2283.1.pdf), 1987
- **Holloway, S.:** Straight and Level, Practical Airline Economics, Ashgate, Aldershot, 2008

- **International Civil Aviation Organization (ICAO) (Hg.):** Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems, [http://www.caa.ro/media/docs/RPAS\\_ICAO\\_Manual.pdf](http://www.caa.ro/media/docs/RPAS_ICAO_Manual.pdf), 2015
- **International Civil Aviation Organization (ICAO) (Hg.):** Unmanned Aircraft Systems (UAS), [https://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_en.pdf), 2011
- **International Telecommunication Union (ITU) (Hg.):** Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace, [www.itu.int/en/ITU-R/space/snl/Documents/R-REP-M.2171-2009-PDF-E.pdf](http://www.itu.int/en/ITU-R/space/snl/Documents/R-REP-M.2171-2009-PDF-E.pdf), 2009
- **Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems (Hg.):** JARUS Glossary, [http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar\\_del\\_jarus\\_glossary\\_v0.7\\_0.pdf](http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_del_jarus_glossary_v0.7_0.pdf), 2018
- **Klußmann, N.; Malik, A.:** Lexikon der Luftfahrt, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer, Berlin, 2012
- **Deutsche Lufthansa AG (Hg.):** Geschäftsbericht 2015, <https://investor-relations.lufthansagroup.com/fileadmin/downloads/de/finanzberichte/geschaeftsberichte/LH-GB-2015-d.pdf>, 2015
- **Lockheed Martin Corporation (Hg.):** K-MAX Unmanned Aircraft System, <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/k-max/K-MAX-brochure.pdf>, 2010
- **Lycoming Engine (Hg.):** Aftermarket Engine Price List, [http://www.piper-germany.de/fileadmin/Dokumente/global/spareparts/pdf/Lycoming\\_Engine\\_PriceList\\_2012.pdf](http://www.piper-germany.de/fileadmin/Dokumente/global/spareparts/pdf/Lycoming_Engine_PriceList_2012.pdf), 2012
- **Lycoming (Hg.):** Lycoming IO 360, [http://11hc.44rf.com/manuals/engine-prop/lycoming/aerosportpower-library/360\\_series\\_ops\\_manual/sec\\_3b-charts.pdf](http://11hc.44rf.com/manuals/engine-prop/lycoming/aerosportpower-library/360_series_ops_manual/sec_3b-charts.pdf), o.J.
- **McDonald, R.:** Establishing Mission Requirements Based on Consideration of Aircraft Operations, <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.C031878>, 2013

- **Merlin, Peter W.:** Ikhana – Unmanned Aircraft System Western State Fire Missions, <https://history.nasa.gov/monograph44.pdf>, 2009
- **Mensen, H.:** Handbuch der Luftfahrt, Springer, New York, 2013
- **Novak, J.; Cañas, A.:** The theory underlying concept maps and how to construct and use them, [https://web.stanford.edu/dept/SUSE/projects/ireport/articles/concept\\_maps/The%20Theory%20Underlying%20Concept%20Maps.pdf](https://web.stanford.edu/dept/SUSE/projects/ireport/articles/concept_maps/The%20Theory%20Underlying%20Concept%20Maps.pdf), 2008
- **Plinke, W.; Rese M.; Utzig P.:** Industrielle Kostenrechnung, Springer, Berlin, Heidelberg, 2015
- **RAVCO Rota Aviation (Hg.):** K-MAX A Revolutionary Unmanned Aerial System: Night Unmanned Aerial Firefighting, <https://cdpsdocs.state.co.us/dfpc/Website/CoE/NightOpsSummit/Day2-0815-RAVCOkmaxUAV-youtube-cdps.pdf>, (NAVAIR Public Release Number SPR-2012-1089), 2012
- **Raymer, D.:** Aircraft Design, A Conceptual Approach, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, 2006
- **Rossow, C.; Wolf, K.; Horst P.:** Handbuch der Luftfahrzeugtechnik, Carl Hanser Verlag, München, 2014
- **Rotax Aircraft Engines (Hg.):** Operators Manual for Rotax Engine Type 914 Series, [http://contrails.free.fr/fichiers2/914\\_owners\\_man\\_d05240.pdf](http://contrails.free.fr/fichiers2/914_owners_man_d05240.pdf), 2010
- **Schweitzer, M.; Küpper H.:** Systeme der Kosten- und Erlösrechnung, Verlag Franz Vahlen, München, 2011
- **Steger, J.:** Kosten- und Leistungsrechnung, 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2006
- **Vlek, Sanders; Vogels Marli:** Aviation Emission and Evaluation of Reduction Options (AERO), Main Report, Part I, Description of the AERO Modelling System, [www.dlr.de/consave/library/Aero-Model.pdf](http://www.dlr.de/consave/library/Aero-Model.pdf), 2000
- **Valavanis, K. P.; Vachtsevanos, G. J.:** Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, Springer, New York, 2015

- 
- **Verkehrslandeplatz Eggersdorf (Hg.):** Verkehrslandeplatz Eggersdorf – Gebühren, <http://www.flugplatz-eggersdorf.de/images/preisliste.pdf>, o.J.
  - **Wittenbrink, P.:** Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr, Grundlagen, Optimierungspotenziale, Green Logistics, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011
  - **Wittenbrink, P.:** Transportmanagement, Kostenoptimierung, Green Logistics, Springer Gabler, Wiesbaden, 2014

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Angrenzende Themengebiete.....	5
Abbildung 2: Einteilung unbemannter Luftfahrzeuge.....	8
Abbildung 3: K-Max mit Schlingenlast .....	10
Abbildung 4: Modifikationen der K-1200 Plattform.....	11
Abbildung 5: NASA Ikhana basierend auf der Predator B Plattform.....	13
Abbildung 6: Tragschrauber-Konfiguration .....	19
Abbildung 7: Tragschrauber Seitenansicht.....	20
Abbildung 8: Tragschrauber Frontalansicht.....	21
Abbildung 9: Tragschrauber Draufsicht .....	21
Abbildung 10: Funktionendiagramm der Luftfracht.....	22
Abbildung 11: Globaler Warentransport.....	23
Abbildung 12: Eigenschaften von Kraftstoffen in der Luftfahrt.....	28
Abbildung 13: Preisverläufe von Rohöl (WTI), Diesel und Kerosin am Golfküstenspotmarkt.....	29
Abbildung 14: Preisverläufe von Rohöl- (WTI), Diesel, Kerosin und Benzin am Golfküstenspotmarkt.....	29
Abbildung 15: Spotpreise für Jet A-1 .....	30
Abbildung 16: Mindest-, Durchschnitts- und Höchstpreise für Jet A-1für Kleinabnehmer .....	32
Abbildung 17: Kernproblem dieser Arbeit .....	35
Abbildung 18: Anzahl der Treffer .....	39
Abbildung 19: Anzahl der Treffer (gefiltert nach 1. Kriterium).....	40
Abbildung 20: Gebräuchliche Kostenklassifizierung in der Luftfahrt.....	41
Abbildung 21: Funktionale Betriebskostenstruktur Cessna 208 nach Conklin und de Decker .....	44
Abbildung 22: Beispielhafter Ablauf einer Transportmission.....	49
Abbildung 23: Zusammenhänge der Transportmission .....	51
Abbildung 24: Kostenverrechnung.....	54
Abbildung 25: Einflussfaktoren auf den Treibstoffpreis.....	64
Abbildung 26: Einflussfaktoren auf den Treibstoffverbrauch.....	65
Abbildung 27: Abschätzung der Systemgesamtkosten.....	71
Abbildung 28: Abschätzung der Anschaffungskosten Input – Output Darstellung....	72
Abbildung 29: Schritte der Kostenabschätzung .....	81
Abbildung 30: DHL Distributionszentrum Rüdersdorf bei Berlin .....	83
Abbildung 31: Luftlinien Flughafen Frankfurt am Main – Distributionszentrum Rüdersdorf.....	84
Abbildung 32: Kostenstruktur im Basis-Szenarios .....	88
Abbildung 33: Kostenstruktur im Best-Case-Szenario.....	90
Abbildung 34: Kostenstruktur im Worst-Case-Szenario.....	91

---

Abbildung 35: Straßenverbindung .....	92
Abbildung 36: Kostenstruktur im Worst-Case-Szenario.....	94

## 10 Formelverzeichnis

Formel 1: Flugdistanz einer Transportmission.....	51
Formel 2: Blockzeit einer Transportmission.....	51
Formel 3: Jährliche Nutzung des Fluggerätes .....	52
Formel 4: Kalkulatorische Abschreibungen .....	56
Formel 5: Kostensatz Abschreibungen.....	56
Formel 6: Kalkulatorische Zinskosten.....	57
Formel 7: Kostensatz Zinskosten .....	57
Formel 8: Lohnkosten.....	57
Formel 9: Kostensatz Lohnkosten .....	58
Formel 10: Kostensatz Triebwerksüberholung .....	58
Formel 11: Kostensatz Wartung gesamt.....	60
Formel 12: Jährliche Wartungskosten .....	61
Formel 13: Kostensatz Wagniskosten .....	63
Formel 14: Jährliche Wagniskosten.....	63
Formel 15: Kraftstoffverbrauch .....	67
Formel 16: Kraftstoffkosten.....	67
Formel 17: Datenübertragungskosten .....	69
Formel 18: RDT&E Mannstunden.....	111
Formel 19: Entwicklungskosten .....	112
Formel 20: Entwicklungs-Support.....	112
Formel 21: Mannstunden Werkzeugbau.....	112
Formel 22: Kosten Werkzeugbau .....	113
Formel 23: Kosten Flugtests.....	113
Formel 24: Fertigungsmannstunden.....	113
Formel 25: Kosten Fertigung .....	114
Formel 26: Kosten Qualitätskontrolle.....	114
Formel 27: Kosten Qualitätskontrolle.....	114

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Deutsche und englische Begrifflichkeiten in Bezug auf unbemannte Luftfahrzeuge.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Tabelle 2: Leistungsdaten Predator XP und Predator B .....	12
Tabelle 3: Fluggeräte – Konfigurationen.....	18
Tabelle 4: Leistungsdaten und Massenabschätzung der Tragschrauber-Konfiguration .....	20
Tabelle 5: Ausgewählte Kolbentriebwerke .....	27
Tabelle 6: Ausgewählte Turboprop-Triebwerke .....	27
Tabelle 7: Besteuerung von Kraftstoffen: EU Mindeststeuersätze und nationale Umsetzung .....	30
Tabelle 8: Rechtliche Möglichkeiten der EU-Mitgliedstaaten zur Besteuerung von Treibstoffen für die gewerbliche Luftfahrt.....	31
Tabelle 9: Funktionale Betriebskostenstruktur einer Cessna 208 nach Conklin und de Decker .....	45
Tabelle 10: Kostenpositionen und Bezugsgrößen des ACOS .....	46
Tabelle 11: Ersatzteilkosten Rotor Bell 206 [USD] .....	59
Tabelle 12: Intervalle und Kosten der Komplettüberholung ausgewählter Triebwerke .....	62
Tabelle 13: Benötigte Triebwerksleistung für versch. Geschwindigkeiten und Nutzlasten .....	65
Tabelle 14: Benötigte Zeit zur Durchführung der Flugphase für versch. Geschwindigkeiten und Strecken .....	66
Tabelle 15: Kraftstoffverbrauch für 600 Kilometer .....	66
Tabelle 16: Laut ITU erforderliche Datenraten.....	68
Tabelle 17: Zusammenhänge zwischen den Input und Outputgrößen .....	74
Tabelle 18: Masse der Flugzeugzelle .....	76
Tabelle 19: Zertifizierungskosten in [EUR].....	77
Tabelle 20: Material-, Produktions- und Qualitätssicherungskosten in [EUR].....	77
Tabelle 21: Gesamtsystemkosten bei 100 produzierten Einheiten [EUR].....	79
Tabelle 22: Gesamtsystemkosten bei 30 produzierten Einheiten [EU] .....	80
Tabelle 23: Geschätzte Gesamtkosten der Transportmission im Basis-Szenario ....	88
Tabelle 24: Geschätzte Gesamtkosten der Transportmission im Best-Case-Szenario .....	89
Tabelle 25: Geschätzte Gesamtkosten der Transportmission im Worst-Case-Szenario .....	91
Tabelle 26: Kostensätze und resultierende Transportkosten.....	93
Tabelle 27: Transportkosten .....	93

## 12 Abkürzungsverzeichnis

ACOS	Aviation Cost Model
AL	Allgemeine Luftfahrt
ALAADy	Automated Low Altitude Air Delivery Projekt
AOPA	Aircraft Owners and Pilots Association
ATM	Air Traffic Management
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATLS	Auto takeoff and landing system
AvGas	Aviation Gasoline
BLOS	Beyond-Line-of-Sight
BRLOS	Beyond radio line-of-sight
C2	Comand and Control
CER	Light UA Operator Certificate
CFR	Code of Federal Regulation
CPB	Certifiable Predator B
CPI	Consumer Price Index
DAA	Dedect-and-Avoid
DAPCA	Development and Procurement Cost of Aircraft
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOC	Direkte operative Kosten
EASA	European Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FBO	Fixed Base Operators
GA	General Aviation
HRC	High Reliabiliy Configuration
i.A.	Im Allgemeinen
ICAO	International Civil Aviation Organization
i.d.R.	In der Regel
ITU	International Telecommunication Union
IOC	Indirekte operative Kosten
JAR	Joint Aviation Requirements
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems
JSSI	Jet Support Service, Inc.
KTAS	Knots True Air Speed
LKW	Lastkraftwagen
LOS	Line-of-Sight

LSA	Light-Sports Aircraft
LUC	Light UA Operator Certificate
MoGas	Motor Gasoline
MTOW	Maximum takeoff weight
MRC	Minimum Risks Configuration
NLR	Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium
RLOS	Direct radio line-of-sight
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft Systems
OPV	Optionally Piloted Vehicle
SORA	Specific Operations Risk Assessment
TBO	Time Between Overhaul
TOC	Total Operating Costs
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VZÄ	Vollzeitäquivalent
WTI	West Texas Intermediate

## 13 Anhang

### I. Formeln zu Kapitel 5.8

$$F_{ME} = (F_{ERF})^{1,4427 * \ln N}$$

mit:

$F_{ME}$  ... Mengeneffektfaktor

$F_{ERF}$  ... Erfahrungsfaktor

$N$  ... Produzierte Einheiten

#### Formel 1: Mengeneffekt

$$h_{R\&D} = 0.0396 * W_{airframe}^{0,791} * v_{max}^{1,526} * n^{0,183} * F_{zert} * F_{COMP}$$

mit:

$h_{R\&D}$  ... Mannstunden für die Entwicklung

$W_{airframe}$  ... Gewicht der Fluggerätestruktur [lb]

$v_{max}$  ... Max. Fluggeschwindigkeit [Knoten]

$n$  ... Geplante Fluggerätestrukturproduktion über 5 Jahre [-]

$F_{zert}$  ... Faktor für die Art der Zertifizierung [-]

$F_{COMP} = 1 + f_{comp}$  ... Faktor Verbundwerkstoffe [-]

$f_{comp}$  ... Anteil Verbundwerkstoff an der Flugzeugzelle [-]

#### Formel 2: RDT&E Mannstunden

$$K_{R\&D} = 2,0969 * h_{R\&D} * k_{h,R\&D} * CPI_{2012}$$

mit:

$K_{R\&D}$  ... Entwicklungskosten

$h_{R\&D}$  ... Mannstunden für die Entwicklung

$k_{h,R\&D}$  ... Kosten eine Mannstunde

$CPI_{2012}$  ... Verbraucherpreisindex (Basisjahr 2012)

### Formel 3: Entwicklungskosten

$$K_{R\&D-Sup} = 0.06458 * W_{airframe}^{0,873} * v_{max}^{1,89} * n_p^{0,346} * CPI_{2012} * F_{zert} * F_{COMP}$$

mit:

$h_{R\&D-Sup}$  ... Mannstunden für die Entwicklung

$W_{airframe}$  ... Gewicht der Fluggerätestruktur [lb]

$v_{max}$  ... Max. Fluggeschwindigkeit [Knoten]

$n_p$  ... Anzahl der Prototypen

$F_{zert}$  ... Faktor für die Art der Zertifizierung (= 0.5 f. LSA, = 1 f. Part 23) [-]

$F_{COMP} = 1 + 0.5 * f_{comp}$  ... Faktor Verbundwerkstoffe [-]

$f_{comp}$  ... Anteil Verbundwerkstoff an der Flugzeugzelle [-]

### Formel 4: Entwicklungs-Support

$$h_{Werk} = 1.0032 * W_{airframe}^{0,764} * v_{max}^{0,899} * n^{0,178} * Q_m^{0,066}$$

mit:

$h_{Werk}$  ... Mannstunden für den Werkzeugbau

$W_{airframe}$  ... Gewicht der Fluggerätestruktur [lb]

$v_{max}$  ... Max. Fluggeschwindigkeit [Knoten]

$n$  ... Geplante Fluggerätestrukturproduktion über 5 Jahre [-]

$Q_m$  ... Produktionsrate pro Monat ( $= \frac{n}{60}$ ) [-]

### Formel 5: Mannstunden Werkzeugbau

$$K_{Werk} = 2,0969 * h_{Werk} * k_{h.Werk} * CPI_{2012}$$

mit:

$K_{R\&D}$  ... Kosten Werkzeugbau

$h_{Werk}$  ... Mannstunden für den Werkzeugbau

$k_{h.Werk}$  ... Kosten einer Mannstunde im Werkzeugbau

$CPI_{2012}$  ... Verbraucherpreisindex (Basisjahr 2012)

#### Formel 6: Kosten Werkzeugbau

#### Flugtests:

$$K_{FT} = 0,009646 * W_{airframe}^{1,16} * v_{max}^{1,3718} * n_p^{1,281} * CPI_{2012} * F_{zert}$$

mit:

$K_{FT}$  ... Kosten für das Flugtestprogramm

$W_{airframe}$  ... Gewicht der Fluggerätestruktur [lb]

$v_{max}$  ... Max. Fluggeschwindigkeit [Knoten]

$n_p$  ... Anzahl der Prototypen

$CPI_{2012}$  ... Verbraucherpreisindex (Basisjahr 2012)

$F_{zert}$  ... Faktor für die Art der Zertifizierung (= 10 f. LSA, = 1 f. Part 23) [–]

#### Formel 7: Kosten Flugtests

#### Fertigung:

$$h_{Fert} = 9,6613 * W_{airframe}^{0,74} * v_{max}^{0,543} * n^{0,524} * F_{zert} * F_{COMP}$$

mit:

$h_{Fert}$  ... Mannstunden für die Fertigung

$W_{airframe}$  ... Gewicht der Fluggerätestruktur [lb]

$v_{max}$  ... Max. Fluggeschwindigkeit [Knoten]

$n$  ... Geplante Fluggerätestrukturproduktion über 5 Jahre [–]

$F_{zert}$  ... Faktor für die Art der Zertifizierung [–]

$F_{KK}$  = Faktor für ein komplexes Klappensystem [–]

$F_{COMP} = 1 + 0,25 * f_{comp}$  ... Faktor Verbundwerkstoffe [–]

$f_{comp}$  ... Anteil Verbundwerkstoff an der Flugzeugzelle [–]

#### Formel 8: Fertigungsmannstunden

$$K_{Fert} = 2,0969 * h_{Fert} * k_{h.Fert} * CPI_{2012}$$

mit:

$K_{Fert}$  ... *Kosten Fertigung*

$h_{Fert}$  ... *Mannstunden für die Fertigung*

$k_{h.Fert}$  ... *Kosten einer Mannstunde in der Fertigung*

$CPI_{2012}$  ... *Verbraucherpreisindex (Basisjahr 2012)*

#### Formel 9: Kosten Fertigung

### Qualitätskontrolle

$$K_{QK} = 0,13 * K_{Fert} * F_{zert} * F_{COMP}$$

mit:

$K_{QK}$  ... *Kosten Qualitätskontrolle*

$K_{Fert}$  ... *Kosten Fertigung*

$F_{zert}$  ... *Faktor für die Art der Zertifizierung [-]*

$F_{COMP} = 1 + 0.5 * f_{comp}$  ... *Faktor Verbundwerkstoffe [-]*

#### Formel 10: Kosten Qualitätskontrolle

### Material

Dieser Punkt umfasst sämtliche (Roh-) Materialien für die Produktion.

$$K_{Mat} = 24,896 * W_{airframe}^{0,689} * v_{max}^{0,624} * n^{0,792} * F_{zert} * CPI_{2012}$$

mit:

$K_{Mat}$  ... *Kosten Material*

$W_{airframe}$  ... *Gewicht der Fluggerätestruktur [lb]*

$v_{max}$  ... *Max. Fluggeschwindigkeit [Knoten]*

$n$  ... *Geplante Fluggeräteproduktion über 5 Jahre [-]*

$F_{zert}$  ... *Faktor für die Art der Zertifizierung [-]*

$CPI_{2012}$  ... *Verbraucherpreisindex (Basisjahr 2012)*

#### Formel 11: Kosten Material

## II. Ersatzteilekosten – Bell 206 L4 Rotorbaugruppe



Atlas Air Service AG · Otto-Lilienthal-Straße 18 · 27777 Ganderkesee / Germany

To:  
DLR-Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt e.V  
Lieferantenbuchhaltung  
51170 Köln

Ship To:  
ATTN: Fabian Leonhardsberger  
DLR-Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt e.V  
Luft- und Raumfahrt e. V.  
Münchener Str. 20  
Weßling 82234

Atlas Air Service AG  
Otto-Lilienthal-Str. 23  
27777 Ganderkesee /  
Germany  
[www.aas.ag](http://www.aas.ag)  
Heinke Suhrkamp  
HB Lager  
[hsuhrkamp@aas.ag](mailto:hsuhrkamp@aas.ag)

### Quotation CQ1579

Quote Date	27.01.2017	Your Contact	Heinke Suhrkamp
Quote Number	CQ1579	Customer Ref.	Bell 206L4
Due Date	07.03.2017	VAT Number	

Item	Part Number / Description	CD	Qty	Unit Price	EA	Line Amt
1	206-011-120-105 TRUNNION Delivery Terms: EX EUROPA	NE	1,00	3.910,00	EA	3.910,00
2	206-011-150-105 FITTING ASSY Delivery Terms: EX EUROPA	NE	1,00	2.134,00	EA	2.134,00
3	206-011-125-001 PIN ASSY Delivery Terms: EX EUROPA	NE	1,00	333,00	EA	333,00
4	206-011-132-113A GRIP-ASSY Delivery Terms: EX EUROPA	NE	1,00	9.540,00	EA	9.540,00
5	206-011-260-101 BOLT Delivery Terms: EX EUROPA	NE	1,00	843,00	EA	843,00
6	206-015-001-115 BLADE ASSY Delivery Terms: EX EUROPA	NE	1,00	55.420,00	EA	55.420,00
7	206-040-535-109 MAST ASSY Delivery Terms: EX EUROPA	NE	1,00	17.284,00	EA	17.284,00
8	206-001-193-001 TUBE ASSY Delivery Terms: EX EUROPA	NE	1,00	2.460,00	EA	2.460,00

**SubTotal:** 91.924,00



Atlas Air Service AG · Otto-Lilienthal-Straße 18 · 27777 Ganderkesee / Germany

## Quotation **CQ1579**

Quote Date	27.01.2017	Your Contact	Heinke Suhrkamp
Quote Number	CQ1579	Customer Ref.	Bell 206L4

Item	Part Number / Description	CD	Qty	Unit Price	Line Amt
	Carry-over:				91.924,00
9	206-310-004-103 <b>STRAP ASSY</b> Delivery Terms: EX EUROPA Replacementnumber for 206-011-154-107	NE	1,00	4.827,00 EA	4.827,00
10	<b>LOCAL SHIPPING COST</b> <b>Domestic Shipping</b> Berechnung erfolgt nach Aufwand		1,00	0,00	0,00
11	<b>SPECIAL DISCOUNT</b> Special Discount		1,00	-3.100,00	-3.100,00

Alle Preise verstehen sich zzgl. Eingangsfracht nach Aufwand

**Sub Total:** 93.651,00

**19% MwSt:** 17.793,69

**Total:** 111.444,69

Amounts stated in \$

### III. Berechnungsblätter der Missionskosten

## Basis Szenario

#### 1. Missionsparameter & Jährliche Nutzung

Missionsparameter		
Fluggeschwindigkeit	200	km/h
Luftlinie	453	km
Umwegfaktor	1,25	-
Flugstrecke	566,25	km
Taxi Abflugort	5	min
Taxi Zielort	5	min
Blockzeit	3,00	h

Jährliche Nutzung		
Jährliche Nutzung pro Fluggerät	2.200	Blockstunden/Jahr

#### 2. Fixe direkte operative Gemeinkosten

Abschreibung		
Abschreibungsbasis	590.000	Euro
Abschreibungszeitraum	10	Jahre
Restwert	20	%
Abschreibung	47.200	Euro/Jahr
	21,5	Euro/Blockstunde

Kalkulatorische Zinsen		
Zinssatz	1,6	%
Kalkulatorische Zinsen	5.664	Euro/Jahr
	2,6	Euro/Blockstunde

Operatorlohnkosten		
Durchschnittliche Vollzeitäquivalente je Fluggerät	1,5	-
Jährliche Lohnkosten je Vollzeitäquivalent	60.000	Euro
Operatorlohnkosten	90.000	Euro/Jahr
	40,9	Euro/Blockstunde

### 3. Variable direkte operative Gemeinkosten

Wartungskosten		
Triebwerk - Komplettüberholung	40	Euro/Blockstunde
Triebwerk - Laufende Wartung & Inspektionen	10	Euro/Blockstunde
Struktur	10	Euro/Blockstunde
Systeme	10	Euro/Blockstunde
Rotor	50	Euro/Blockstunde
<b>Gesamt</b>	120	Euro/Blockstunde

Kalkulatorische Wagniskosten		
Ausfallrate	10.000	h
Ø Zeit zw. Ausfällen	4,5	Jahre
Erwartete Schadenshöhe	147.500	Euro
Kalkulatorische Wagniskosten	14,8	Euro/Blockstunde
	32.450	Euro/Jahr

### 4. Variable direkte operative Einzelkosten

Treibstoffkosten		
Treibstoffart	Kerosin	-
Treibstoffdichte	0,84	kg/l
Treibstoffpreis	0,804	Euro/Liter
Benötigte Triebwerksleistung	169,00	kW
Spezifischer Verbrauch	0,32	kg je kW/h
Verbrauch je Stunde	59,49	kg / Stunde
	70,82	Liter / Stunde
Verbrauchsaufschlag f. Taxi-Phasen & Mehrverbräuche	10,00	Prozent
Treibstoffverbrauch f. die Mission	220,56	Liter
Treibstoffkosten f. die Mission	177,33	Euro

Start- & Landegebühren		
Startgebühren	50	Euro
Landegebühren	20	Euro

Kommunikationskosten		
Durchschnittliche Datenrate	58	kbit/Sekunde
Datenmenge pro Stunde	26,1	Megabyte/Stunde
Übertragungstechnologie 1 (z.B. Mobilfunk) Kostensatz	0,001	Euro/Megabyte
Übertragungstechnologie 2 (z.B. Satellit) Kostensatz	1,000	Euro/Megabyte
Verfügbarkeit/Nutzung Übertragungstechnologie 1	90	%
Verfügbarkeit/Nutzung Übertragungstechnologie 2	10	%
Kommunikationskosten	2,6	Euro/Blockstunde

# Best Case Szenario

## 1. Missionsparameter & Jährliche Nutzung

Missionsparameter		
Fluggeschwindigkeit	200	km/h
Luftlinie	453	km
Umwegfaktor	1,25	-
Flugstrecke	566,25	km
Taxi Abflugort	5	min
Taxi Zielort	5	min
Blockzeit	3,00	h

Jährliche Nutzung		
Jährliche Nutzung pro Fluggerät	4.380	Blockstunden/Jahr

## 2. Fixe direkte operative Gemeinkosten

Abschreibung		
Abschreibungsbasis	590.000	Euro
Abschreibungszeitraum	10	Jahre
Restwert	20	%
Abschreibung	47.200	Euro/Jahr
	10,8	Euro/Blockstunde

Kalkulatorische Zinsen		
Zinssatz	1,6	%
Kalkulatorische Zinsen	5.664	Euro/Jahr
	1,3	Euro/Blockstunde

Operatorlohnkosten		
Durchschnittliche Vollzeitäquivalente je Fluggerät	0,0	-
Jährliche Lohnkosten je Vollzeitäquivalent	60.000	Euro
Operatorlohnkosten	0	Euro/Jahr
	0,0	Euro/Blockstunde

### 3. Variable direkte operative Gemeinkosten

Wartungskosten		
Triebwerk - Komplettüberholung	40	Euro/Blockstunde
Triebwerk - Laufende Wartung & Inspektionen	10	Euro/Blockstunde
Struktur	10	Euro/Blockstunde
Systeme	10	Euro/Blockstunde
Rotor	50	Euro/Blockstunde
<b>Gesamt</b>	120	Euro/Blockstunde

Kalkulatorische Wagniskosten		
Ausfallrate	10.000	h
Ø Zeit zw. Ausfällen	2,3	Jahre
Erwartete Schadenshöhe	0	Euro
Kalkulatorische Wagniskosten	0,0	Euro/Blockstunde
	0	Euro/Jahr

### 4. Variable direkte operative Einzelkosten

Treibstoffkosten		
Treibstoffart	Kerosin	-
Treibstoffdichte	0,84	kg/l
Treibstoffpreis	0,500	Euro/Liter
Benötigte Triebwerksleistung	169,00	kW
Spezifischer Verbrauch	0,32	kg je kW/h
Verbrauch je Stunde	59,49	kg / Stunde
	70,82	Liter / Stunde
Verbrauchsaufschlag f. Taxi-Phasen & Mehrverbräuche	10,00	Prozent
Treibstoffverbrauch f. die Mission	220,56	Liter
Treibstoffkosten f. die Mission	110,28	Euro

Start- & Landegebühren		
Startgebühren	50	Euro
Landegebühren	20	Euro

Kommunikationskosten		
Durchschnittliche Datenrate	0	kbit/Sekunde
Datenmenge pro Stunde	0,0	Megabyte/Stunde
Übertragungstechnologie 1 (z.B. Mobilfunk) Kostensatz	0,001	Euro/Megabyte
Übertragungstechnologie 2 (z.B. Satellit) Kostensatz	1,000	Euro/Megabyte
Verfügbarkeit/Nutzung Übertragungstechnologie 1	90	%
Verfügbarkeit/Nutzung Übertragungstechnologie 2	10	%
Kommunikationskosten	0,00	Euro/Blockstunde

# Worst Case Szenario

## 1. Missionsparameter & Jährliche Nutzung

Missionsparameter		
Fluggeschwindigkeit	200	km/h
Luftlinie	453	km
Umfwegfaktor	1,25	-
Flugstrecke	566,25	km
Taxi Abflugort	5	min
Taxi Zielort	5	min
Blockzeit	3,00	h

Jährliche Nutzung		
Jährliche Nutzung pro Fluggerät	365	Blockstunden/Jahr

## 2. Fixe direkte operative Gemeinkosten

Abschreibung		
Abschreibungsbasis	915.000	Euro
Abschreibungszeitraum	10	Jahre
Restwert	20	%
Abschreibung	73.200	Euro/Jahr
	200,5	Euro/Blockstunde

Kalkulatorische Zinsen		
Zinssatz	1,6	%
Kalkulatorische Zinsen	8.784	Euro/Jahr
	24,1	Euro/Blockstunde

Operatorlohnkosten		
Durchschnittliche Vollzeitäquivalente je Fluggerät	1,0	-
Jährliche Lohnkosten je Vollzeitäquivalent	60.000	Euro
Operatorlohnkosten	60.000	Euro/Jahr
	164,4	Euro/Blockstunde

### 3. Variable direkte operative Gemeinkosten

Wartungskosten		
Triebwerk - Komplettüberholung	40	Euro/Blockstunde
Triebwerk - Laufende Wartung & Inspektionen	10	Euro/Blockstunde
Struktur	10	Euro/Blockstunde
Systeme	10	Euro/Blockstunde
Rotor	50	Euro/Blockstunde
<b>Gesamt</b>	120	Euro/Blockstunde

Kalkulatorische Wagniskosten		
Ausfallrate	10.000	h
Ø Zeit zw. Ausfällen	27,4	Jahre
Erwartete Schadenshöhe	915.000	Euro
Kalkulatorische Wagniskosten	91,5	Euro/Blockstunde
	33.398	Euro/Jahr

### 4. Variable direkte operative Einzelkosten

Treibstoffkosten		
Treibstoffart	Kerosin	-
Treibstoffdichte	0,84	kg/l
Treibstoffpreis	0,804	Euro/Liter
Benötigte Triebwerksleistung	169,00	kW
Spezifischer Verbrauch	0,32	kg je kW/h
Verbrauch je Stunde	59,49	kg / Stunde
	70,82	Liter / Stunde
Verbrauchsaufschlag f. Taxi-Phasen & Mehrverbräuche	10,00	Prozent
Treibstoffverbrauch f. die Mission	220,56	Liter
Treibstoffkosten f. die Mission	177,33	Euro

Start- & Landegebühren		
Startgebühren	50	Euro
Landegebühren	20	Euro

Kommunikationskosten		
Durchschnittliche Datenrate	58	kbit/Sekunde
Datenmenge pro Stunde	26,1	Megabyte/Stunde
Übertragungstechnologie 1 (z.B. Mobilfunk) Kostensatz	0,001	Euro/Megabyte
Übertragungstechnologie 2 (z.B. Satellit) Kostensatz	1,000	Euro/Megabyte
Verfügbarkeit/Nutzung Übertragungstechnologie 1	0	%
Verfügbarkeit/Nutzung Übertragungstechnologie 2	100	%
Kommunikationskosten	26,10	Euro/Blockstunde