



Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Neue Konzepte zur Seilmontage bei Hängebrücken - Eine Untersuchung von UAS gestützten Methoden

Bachelorthesis

für den Bachelor of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor:	Haoran Li
Matrikelnummer:	██████████
1. Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. André Borrmann
2. Betreuer:	Felix Eickeler M.Sc.
Ausgabedatum:	06. November 2017
Abgabedatum:	20. April 2018

Abstract

In this work, a new method to transport the pilot rope of a suspension bridge using an unmanned aerial System (UAS) will be introduced. The use of a UAS should be environmentally friendly while saving the transport costs in comparison to other conventional methods used in projects up until now. Throughout the years the idea of using a UAS on construction sites became more and more popular. In recent years examples of transporting a pilot rope with a UAS succeeded around the world. However, there are few detailed pieces of research and documentation to explain and explore this kind of use further.

By combining the knowledge of rope statics and force distribution of a UAS, it is possible to achieve an insight of an ideal flight situation quickly with the help of software. To demonstrate the possibility of this method, a detailed calculation of the longest suspension bridge will be presented. Furthermore, the few projects using this method will be calculated and compared to each other to find out if there is potential for improvement.

Keywords: UAS, suspension bridge, pilot rope, rope static, force distribution.

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit einer alternativen Methode zur Seilmontage bei Hänge-seilbrücken. Es wird im Detail auf die Verwendung bzw. Eignung von UASs (Unmanned Aerial System) eingegangen. Dabei sollen u.a. die Vorteile bzw. Nachteile dieser Alternative gegenüber den aktuell verwendeten Transport-Methoden hervorgehoben werden.

In der jüngsten Vergangenheit wurde bereits die UAS-Methode für den Transport des Führungsseil erfolgreich eingesetzt. Jedoch fehlt aktuell eine einschlägige Literatur dieser Methode, welche sich mit der Grundlagenermittlung und Nachweisführung beschäftigt. Um einen Überblick über den Einsatz von UASs zu erlangen, befasst sich die Bachelorarbeit ebenfalls mit den Themengebieten der Seilstatik und Kraftverteilung am UAS. Diese Themengebiete gehören hierbei zum Basiswissen für den Einsatz der UAS-Methode.

Darüber hinaus wird im weiteren Verlauf der Bachelorarbeit zusätzliches Basiswissen zum Bauablauf einer Hängebrücke und Montage des Führungsseils vermittelt. Um die Vor- bzw. Nachteile der UAS-Methode zu veranschaulichen, erfolgt eine Einführung in die aktuell verwendeten Transportmethoden des Führungsseils, welche den aktuellen Stand der Technik darstellen. Nach der Einführung in die Funktionsweise eines UAS können die Einsatzmöglichkeiten im Baugewerbe näher definiert werden. Eine exakte Definition der Einsatzmöglichkeiten bzw. der Randbedingungen erfolgt durch eine mathematische bzw. physikalische Nachweisführung der Problemstellung, welche mittels eines eigens entwickelten Berechnungsprogrammes erfolgt.

Der Nachweis der Korrektheit des Berechnungsprogramms und allgemein der im Zuge dieser Arbeit aufgestellten Theorie, zur Eignung der UAS-Methode für den Transport des Führungsseils, erfolgt mit Hilfe einer eigenen durchgeführten Versuchsreihe.

Ein weiterer Nachweis der aufgestellten Theorie erfolgt anhand von Fallbeispielen aus der jüngsten Vergangenheit. Darüber hinaus wird der theoretische Nachweis der Eignung der UAS-Methode, für einen Transport des Führungsseils am Beispiel der längsten Hängebrücke der Welt, erbracht. Zuletzt wird noch auf den gesetzlichen Rahmen für die Verwendung von UASs in Deutschland eingegangen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI	
Tabellenverzeichnis	VIII	
Abkürzungsverzeichnis	IX	
1	Einführung und Motivation	1
1.1	Einführung	1
1.2	Ziel der Arbeit	1
1.3	Aufbau der Arbeit	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Hängeseilbrücken und Montage des Führungsseils	3
2.1.1	Freihängende-Methode	4
2.1.2	Schwimmende-Methode	4
2.1.3	Rakete-Methode	5
2.1.4	Helikopter-Methode	5
2.1.5	Vergleich aller Methoden	7
2.2	UAS und Multikopter	9
2.2.1	Bestandteile eines Multikopters	10
2.2.2	Bauformen des Multikopters	11
2.2.3	Multikopter vs. Helikopter	14
2.3	Seilstatik	15
2.3.1	Seilkraft für Seile mit horizontaler Sehne	16
2.3.2	Seilkraft für Seile mit schräger Sehne	19
2.4	Das Ausgleichsgewicht und die Kraftverteilung	22
3	Messmethodenentwicklung	27
3.1	Programm zur Berechnung	27
3.2	Messversuche	29
3.2.1	Seilkraftmessung	30
3.2.2	Testflug	31

4	Fallbeispiele	35
4.1	Longjiang-Brücke.....	36
4.1.1	Gewähltes UAS.....	36
4.1.2	Montagekonzept des Führungsseils	37
4.1.3	Mathematische Untersuchung	39
4.2	Highline 179.....	42
4.2.1	Interview mit der Firma SWISSROPE.....	43
4.2.2	Mathematische Untersuchung	46
4.3	Akashi-Kaikyo-Brücke als Rechenbeispiel.....	49
4.3.1	Mathematische Untersuchung der UAS-Alternative.....	50
5	Auswertung und Fazit der Fallbeispiele	55
5.1	Longjiang-Brücke.....	55
5.2	Highline 179.....	56
5.3	Rechtliche Grundlagen in Deutschland.....	56
5.4	Fazit.....	57
6	Zusammenfassung und Ausblick	58
	Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer modernen Hängebrücke (Brown, 2005).....	3
Abbildung 2: Freihängend-Methode (Kashima, 1998)	4
Abbildung 3: Schwimmend-Methode (Kashima, 1998).....	4
Abbildung 4: Rakete-Methode (Guo et al., 2014)	5
Abbildung 5: Helikopter-Methode (Kashima, 1998)	6
Abbildung 6: Bestandteile eines Multikopters (Quan, 2017)	10
Abbildung 7: diagonale Größe des Hexakopters F550 von DJI (Quan, 2017)	10
Abbildung 8: (von links nach rechts) Quadro-, Hexa-, Oktokopter (drohnen.de)	11
Abbildung 9: Y6- und X8-Bauform (Liang, 2016)	13
Abbildung 10: Rotorenmechanik eines Helikopters (Liang, 2015)	14
Abbildung 11: Motor eines Multikopters mit Festpropelle (Liang, 2015)	14
Abbildung 12: Seil unter Wirkung des Eigengewichts (Palkowski, 1990)	16
Abbildung 13: Seil mit schräger Sehne (Palkowski, 1990).....	19
Abbildung 14: Darstellung der Seilordinate y (Palkowski, 1990).....	19
Abbildung 15: Kraftverteilung am Knoten mit Ausgleichsgewicht	22
Abbildung 16: Systemdarstellung am Seil mit schräger und horizontaler Sehne	22
Abbildung 17: Kraftverteilung ohne Ausgleichsgewicht unter dem Einflusswinkel φ	24
Abbildung 18: Einfluss der Flugneigung auf maßgebende Auftriebskraft	26
Abbildung 19: Tabelle „Seilgleichung“	27
Abbildung 20: 1. Ausschnitt der Tabelle „Kraftverteilung“	28
Abbildung 21: 2. Ausschnitt der Tabelle "Kraftverteilung"	28
Abbildung 22: VBA-Skript zur Tabelle "Seilgleichung"	28
Abbildung 23: DJI Phantom 4 (DJI)	30
Abbildung 24: Polyamidseil (Kanirope)	30
Abbildung 25: Messmethode Seilkraft	30
Abbildung 26: Messung des maximalen Schubs	32
Abbildung 27: Wetterbedingung beim Testflug (timeanddate.de)	32

Abbildung 28: Testflug mit Phantom 4	33
Abbildung 29: Longjiang-Brücke in China (Sakowski, 2016)	36
Abbildung 30: Longjiang-Brücke mit dem Geländeprofil (Sakowski, 2016)	36
Abbildung 31: FXQ-2 bei der Longjiang-Brücke (Shuo, 2015).....	37
Abbildung 32: Geländeprofil Longjiang-Brücke mit max. Seildurchhang	40
Abbildung 33: Flugaufnahmen der FXQ-2 (eppurca, pamihe, 2014)	41
Abbildung 34: Highline179 (highline179.tirol)	42
Abbildung 35: Geokarte der Highline 179 (Amt der Tiroler Landesregierung, 2018)	42
Abbildung 36: Geländeprofil der Highline 179	43
Abbildung 37: Aufnahme des Videos von Highline 179 (highline179.tirol).....	45
Abbildung 38: Phantom 2 Vision von DJI (DJI, 2014).....	46
Abbildung 39: Angelschnur von Seaknight (seaknightfishing)	46
Abbildung 40: Darstellung des Führungsseils bei Highline 179	47
Abbildung 41: Akashi-Kaikyo-Brücke (Kim Rötzel, 2005)	49
Abbildung 42: Experiment zur Kraftverteilung (Takeno et al., 1997).....	49
Abbildung 43: Experiment zur Untersuchung des Durchhangs (Takeno et al., 1997)	49
Abbildung 44: Bauplan der Akashi-Kaikyo-Brücke (Takeno et al., 1997)	50
Abbildung 45: Darstellung der schrägen Sehne der Akashi-Kaikyo-Brücke	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: bisherige Methoden zum Montage des Führungsseils (Guo et al., 2014) ..	7
Tabelle 2: Methode zum Montage des Führungsseils der längsten Brücken der Welt (Guo et al., 2014)	8
Tabelle 3: Seilmessung per Hand im Vergleich mit Soll-Werten.....	31
Tabelle 4: Kraftverteilung in S-mode	31
Tabelle 5: Beobachtung beim Testflug	33
Tabelle 6: Mechanische Daten der Seile an der Longjiang-Brücke (Shuo, 2015).....	38
Tabelle 7: Seilkräfte und Anforderungen—Hauptspann der Longjiang-Brücke.....	40
Tabelle 8: Seilkräfte und Anforderungen—Hauptspann der Highline 179	47
Tabelle 9: Kraftverteilung und erforderlicher Schub beim Fall Akashi-Kaikyo-Brücke, horizontale Sehne	52
Tabelle 10: Kraftverteilung und erforderlicher Schub beim Fall Akashi-Kaikyo-Brücke, schräge Sehne	53

Abkürzungsverzeichnis

UAS	Unmanned Aerial System
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
NN	Nicht notwendig
AGG	Ausgleichsgewicht
UHMWPE	ultrahigh molecular weight polyethylene
ESC	Electronic Speed Controller
IMU	Inertia Measurement Unit

1 Einführung und Motivation

1.1 Einführung

Die folgende Arbeit befasst sich mit der Verwendung von modernen Hilfsmitteln, z.B. UAS (siehe Kapitel 2), beim Bau von Hängebrücken. Dabei wird das Führungsseil mittels UAS von einem Pylon zum nächsten gespannt. Nur durch den technologischen Fortschritt in der jüngeren Vergangenheit wurde die Verwendung von UAS im Bauwesen ermöglicht. Jedoch werden weder Dokumentationen noch Erläuterungen zur Verwendung solcher UAS veröffentlicht, wobei die Verwendung ein erhöhtes Schadenspotenzial für Mensch und Maschine birgt.

In der Bachelorarbeit wird sowohl auf das verwendete Konzept der UAS anhand von Fallbeispielen eingegangen, sowie deren Verwendung mathematisch bzw. physikalisch erklärt. Dabei ist das Ziel die Einsatzmöglichkeiten von UASs im Bauwesen und insbesondere im Brückenbau darzustellen. Die in dieser Arbeit verwendete Theorie und Berechnungsmethoden werden durch praktische Versuche bzw. Testflüge bestätigt und ausgewertet.

1.2 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit soll mit Hilfe einer Einführung in die Seilstatik die Möglichkeit der Verwendung von UAS als Träger eines Führungsseils dargestellt werden. Dabei stellt die Verwendung von UAS eine Alternative zu den aktuell verwendeten Montagemöglichkeiten des Führungsseils dar. Zu den aussagekräftigsten Vorteilen der Verwendung von UAS zählen zweifelslos eine hohe Effizienz und Wirtschaftlichkeit. Dies soll u.a. im Zuge der Bachelorarbeit dargestellt werden. Neben den technischen Einsatzmöglichkeiten werden ebenfalls die rechtlichen Grundlagen zur Anwendung des UASs beleuchtet.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Verfahren der Führungsseilmontage bei Hängebrücken nach dem aktuellen Stand der Technik vorgestellt und verglichen. Dabei stehen die Merkmale Wirtschaftlichkeit, Effizienz und Umweltschutz im Fokus. Anschließend wird auf die Grundlage des UASs und dessen Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlichen

Verfahren eingegangen. Im letzten Teil des Kapitels werden die Grundlagen der Seilstatik und Kraftverteilung erläutert.

In Kapitel 3 werden die vorher gezeigten Seilberechnungen mit Hilfe eines eigens entwickelten Berechnungsprogramms angewandt. Außerdem befasst sich das Kapitel mit eigenen Versuchsreihen und vergleicht die aufgestellte Theorie mit den Versuchsergebnissen.

In Kapitel 4 werden zwei Fallbeispiele aus Asien und Europa erläutert, bei welchen der Führungsseilzug mittels UAS erfolgreich ausgeführt wurde. Dabei werden die Fallbeispiele mit dem in Kapitel 3 entwickelten Berechnungsprogramm nachgerechnet. Im letzten Punkt erfolgt ein theoretischer Versuch zur Eignung der UAS-Methode am Beispiel der längsten Hängeseilbrücke der Welt.

Das Kapitel 5 befasst sich mit der Auswertung der Fallbeispiele. Außerdem erfolgt ein Fazit.

Im Kapitel 6 erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeit. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf weiterführende Aspekte gegeben.

2 Stand der Technik

2.1 Hängeseilbrücken und Montage des Führungsseils

Die Geschichte der Hängebrücken reicht über 2500 Jahre in die Vergangenheit. Die ersten Hängebrücken bestanden aus Bambusseilen und wurden in Asien errichtet. Einige dieser „Bambusseilbrücken“ stehen heute immer noch. Beispielsweise die Bambusseilbrücke über dem Fluss Trisuli in Nepal (Brown, 2005).

Eine moderne Hängeseilbrücke besteht aus Anker, Pylonen, Tragseilen, Hängeseilen und der Fahrbahn. „Stahlketten und Seile aus Naturfasern oder Stahl schwingen sich über Stützen-Pylone genannt und sind in Ankerblöcke eingespannt (Bühler, 2000). Das Führungsseil (Englisch „pilot rope“) gehört zu den wichtigsten Bestandteilen beim Bau einer Hängebrücke. Mit Hilfe des Führungsseils wird das Tragseil von einem Ufer zum nächsten gespannt. Im späteren Bauverlauf erfolgt ein Großteil des Lastabtrags über das Tragseil.

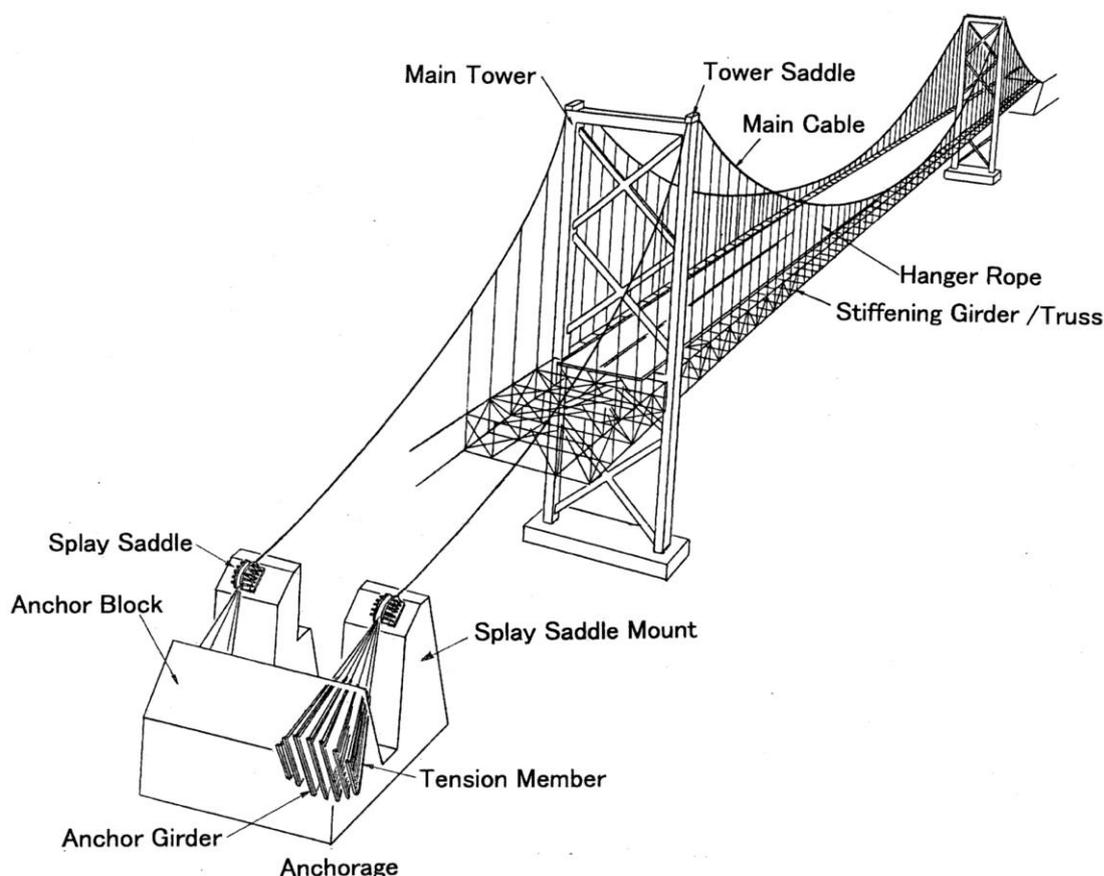


Abbildung 1: Aufbau einer modernen Hängebrücke (Brown, 2005)

Nachdem die Pylonen und Anker errichtet sind, stellt das Führungsseil die erste Verbindung zwischen den Ankern dar. In der Baupraxis gibt aktuell 4 Methoden der Führungsseilmontage, welche in folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

2.1.1 Freihängende-Methode

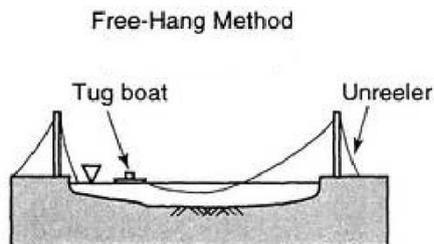


Abbildung 2: Freihängend-Methode (Kashima, 1998)

Die Freihängende-Methode wird bei Flüssen oder Meerengen verwendet. Dabei ist die Voraussetzung ein hindernisfreies Flussbett bzw. Meeresgrund. Zunächst erfolgt die Verbindung der Anker mit den Pylonen durch das Führungsseil. Von beiden Pylonen aus werden die Enden des Führungsseils ins Wasser bzw. auf den Grund des Flusses bzw. Meeres abgelassen. Anschließend werden bei Enden des Führungsseils mit Booten zwischen den Pylonen geführt. Dabei läuft das Seil am Grund des Gewässers. Nachdem die Enden verbunden sind, wird das Seil bis zum geplanten Durchhang gespannt. Während des Spannens des Führungsseils muss der Schiffsverkehr gesperrt werden. Diese Methode kam z.B. bei der Golden Gate Bridge zum Einsatz (Che, 2009).

2.1.2 Schwimmende-Methode

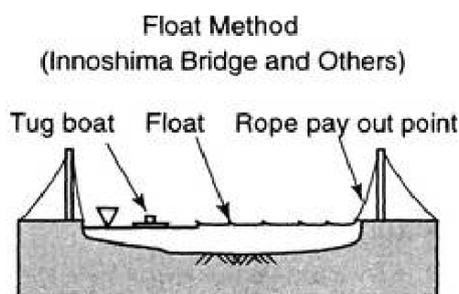


Abbildung 3: Schwimmend-Methode (Kashima, 1998)

Die Schwimmende-Methode stellt eine abgewandelte Variante der Freihängenden-Methode dar. Dabei wird diese Methode bei Gewässern angewendet, welche Hindernisse, wie z.B. Riffe, am Grund des Gewässers aufweisen. Analog der Freihängenden-

Methode fungiert zunächst das Führungsseil als Verbindung zwischen Anker über Pylonen. Vom Pylonen werden nun die Enden des Führungsseils direkt auf ein Boot abgelassen. Damit das Führungsseil beim Transport nicht sinkt werden Schwimmkörper an diesem angebracht. Schließlich werden beiden Enden verbunden und auf die geplante Höhe vorgespannt. Diese Methode wurde beispielsweise bei dem Großen Belt in Dänemark eingesetzt (Che, 2009).

2.1.3 Rakete-Methode



Abbildung 4: Rakete-Methode (Guo et al., 2014)

Die Rakete-Methode wurde zum ersten Mal im Jahr 2006 bei dem Bau der chinesischen Siduhe-Brücke verwendet. Am Abflugort der Rakete wird diese in einer Anlaufschiene befestigt. An die Rakete wird im Anschluss das Führungsseil angebracht. Diese Methode erfordert eine exakte Berechnung der Fluggeschwindigkeit und Flugbahn. Dazu muss besondere Acht auf die Windrichtung und Windgeschwindigkeit gegeben werden. Die Verwendung einer Rakete eignet sich besonders für unwegsames Gelände, bei welchem herkömmliche Methoden sehr zeitintensiv bzw. nicht realisierbar sind. Ein besonderes Risiko dieser Methode stellt eine hohe Brandgefahr des Baugrundes dar. Außerdem muss ein ausreichender Sicherheitsraum gewährleistet werden, da die verwendeten Raketen einen Landeradius von ca. 40m besitzen (Guo et al., 2014).

2.1.4 Helikopter-Methode

Bei der Planung der Akashi-Kaikyo-Brücke konnten die bisher erwähnten Methoden nicht angewendet werden. Durch das sehr hohe Verkehrsaufkommen von ca. 1400 Schiffen pro Tag konnten die Freihängende und Schwimmende Methode nicht gewählt

werden. Die Raketenmethode wurde ebenfalls aufgrund des hohen Gefahrenpotentials ausgeschlossen. Nach vielen Experimenten wurde die Entscheidung getroffen, ein Helikopter als Träger des Führungsseils zu benutzen. (Takeno et al., 1997)

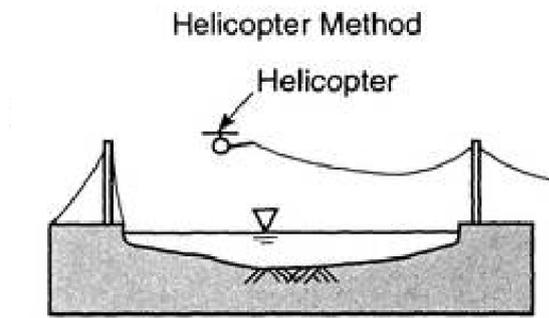


Abbildung 5: Helikopter-Methode (Kashima, 1998)

Abbildung 5 zeigt eine Skizze des verwendeten Helikopters. Unter dem Helikopter ist ein Ausgleichsgewicht angebracht, an dem das 10mm starke Führungsseil aus Aramide angeschlossen ist. Das Ausgleichsgewicht dient zur Minimierung des Ziehwinkeles. Außerdem verhindert das Gewicht, dass das Seil in den Propeller des Helikopters gelangt. Um zu jedem Zeitpunkt einen geringen Durchhang des Seiles zu gewährleisten, wurde das Tragseil vorgespannt. Der Transport und die Montage des Führungsseils werden im Folgenden stichpunktartig aufgezählt (Kashima, 1998):

- Transport des Führungsseils von einem Anker zum nächstgelegenen Pylon
- Das Führungsseil wird über dem ersten Pylon von Bauarbeitern befestigt
- Das Führungsseil wird zum nächsten Pylon mit dem Helikopter transportiert und befestigt.
- Das Führungsseil wird vom letzten Pylon zum Anker transportiert und dort verankert.

2.1.5 Vergleich aller Methoden

Nachfolgend werden alle Methoden in Hinsicht auf Arbeitszeit, passende Einsatzgebiete und Randbedingungen untersucht: (Che, 2009)

	Freihängend	Schwimmend	Rakete	Helikopter
ARBEITSZEIT	1-2 Tage	1-2 Tage	1 Minute	30 Min. – 2 St.
EINSATZGEBIET	Gewässer ohne Hindernisse am Grund	Gewässer mit Hindernissen am Grund	Talgebiet im Gebirge	Talgebiet im Gebirge, Gewässer
SCHIFFSVERKEHRSPERRUNG	ja	ja	nein	nein
REICHWEITE	uneingeschränkt	uneingeschränkt	500 – 1200m	2000m
SEILMATERIAL	Stahl	Stahl	Polyamid	Aramide
RANDBEDINGUNG	ohne Hindernisse am Wasserboden, langsame Flussströmung	langsame Flussströmung	Luffreiheit, 100m ² Raketenstartplatz, große Sichtweite	Luffreiheit, 500m ² Helikopterplattform, große Sichtweite

Tabelle 1: bisherige Methoden zum Montage des Führungsseils (Guo et al., 2014)

In Abhängigkeit der Randbedingungen in den Einsatzgebieten werden aktuell die oben vorgestellten Methoden eingesetzt.

Die folgende Tabelle zählt einige Beispiele von Hängeseilbrücken und die verwendeten Methoden der Führungsseilmontage auf. (Guo et al., 2014)

Nr.	Name	Hauptspannweite	Land	Fertigstellung	Methode
1	Akashi-Kaikyo-Brücke	1990 m	Japan	1998	Helikopter
2	Zhoushan-Xihoumen-Brücke	1650 m	China	2008	Helikopter
3	Großer Belt Ostbrücke	1624 m	Dänemark	1996	Schwimmend
4	RunyangYangtze-Brücke	1490 m	China	2005	Freihängend
5	Humber Bridge	1410 m	UK	1981	Schwimmend

Tabelle 2: Methode zum Montage des Führungsseils der längsten Brücken der Welt (Guo et al., 2014)

Die Rakete-Methode ist auf der einen Seite die zeitsparendste Methode, hat jedoch den Nachteil, dass der Landeradius, aufgrund der Windbeeinflussung in Querrichtung, großen Schwankungen unterliegt und somit nicht exakt bestimmt werden kann. Diese Methode erfordert einen hohen Maß an Brandschutzmaßnahmen (Guo et al., 2014).

Die Freihängende sowie Schwimmende Methode können jeweils nur bei freiem Wasserweg eingesetzt werden. Dies führt somit indirekt zu zusätzlichen Kosten durch eine Umleitung des Schiffsverkehrs (Kitagawa, 2004).

Der entscheidendste Vorteil der Helikopter-Methode liegt in ihrer Unabhängigkeit von Ort und Verkehr und einer Optimierung des Zeit- sowie Arbeitsaufwandes. Ein nicht zu vernachlässigbarer Nachteil stellt die Witterungsabhängigkeit der Methode dar. So steigt das Unfallrisiko bei schlechter Witterung und erfordert somit eine hohe Qualifikation des Piloten. Außerdem ist eine Helikopter-Plattform in der Nähe der Baustelle notwendig (Takeno et al., 1997).

In den letzten Jahren erfolgte eine intensive Weiterentwicklung und Verbreitung der UASs. Dadurch war es möglich UASs experimentell für die Kabelmontage bei Hängebrücken einzusetzen, um erste Erfahrungen zu sammeln. Darauf wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen.

2.2 UAS und Multikopter

Bei einem UAS, auf Englisch „Unmanned Aerial System“, handelt es sich um „unbemannte Fluggeräte, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden“. Dieser wird umgangssprachlich als „Drohne“ bezeichnet (BMVI, 2017). „Grundsätzlich lassen sich zwei Typen von Drohnen unterscheiden: Starrflügler und Kopter“ (Schlesinger & Vogt, 2017).

Beim Starrflügler entsteht der Auftrieb hauptsächlich durch die spezielle Form der Tragflächen. Diese Systeme zeichnen sich durch eine hohe Energieeffizienz aus und sind somit in der Lage, in kurzer Zeit große Flächen erfassen zu können. Jedoch ist das Starten und Landen ohne Start- und Landebahn unmöglich (Wang et al., 2016).

Der Auftrieb von Koptersystemen wird dagegen ausschließlich durch das Drehen der Rotoren erzeugt. Die Energieeffizienz ist im Vergleich zu Starrflüglern deutlich geringer, was sich letztlich in einer deutlich geringeren maximalen Flugdauer niederschlägt. Diese Bauart bietet dafür jedoch den Vorteil, in der Luft stehen beziehungsweise über einem Punkt steigen und sinken zu können (Schlesinger & Vogt, 2017).

Die Wahl eines geeigneten UAS ist stets an die Umgebungsbedingungen gebunden. Bei Transporten von Seilen über anspruchsvolles Gelände, wie z.B. Gewässer oder Schluchten, ist durch flexible Start- und Landemöglichkeiten und eine bessere Manövrierfähigkeit ein Multikopter zu wählen.

Unter einem Multikopter wird ein Fluggerät mit mehr als einem in der Luft rotierenden Propeller verstanden (Kim, Joo, & Jang, 2017). Der erste Multikopter mit Festpropeller wurde 1923 von De Bothezat gebaut. Jedoch war die Technologie noch nicht ausgereift, sodass ab diesem Zeitpunkt eine intensive Weiterentwicklung von Multikoptern verfolgt wurde (Agrawal & Shrivastav, 2013). Aktuell sind Multikopter in verschiedenen Bauformen, wie z.B. Quadrocopter, Hexakopter oder Oktokopter erhältlich.

2.2.1 Bestandteile eines Multikopters

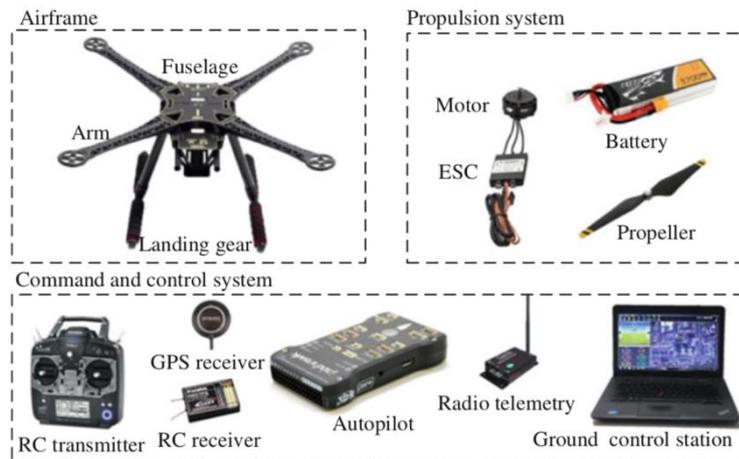


Abbildung 6: Bestandteile eines Multikopters (Quan, 2017)

Grundsätzlich besteht ein Multikopter-System aus 3 Teilsystemen(Quan, 2017):

- Chassis
- Antriebssystem
- Kontrollsystem.

Das Chassis der Drohne bietet eine Plattform, welche alle Einbauteile des Multikopters zusammenhält. Beim Bauen eines Multikopters sollen alle Eigenschaften des Chassis berücksichtigt werden, darunter die Bauform, das Gewicht, die diagonale Größe und das Material (Baichtal, 2015).

Das Gewicht des Chassis wird hauptsächlich durch seine Größe und sein Material bestimmt. Dabei gilt:

Unter demselben Schub verfügt ein Multikopter bei geringerem Chassisgewicht eine größere Nutzlastkapazität (Quan, 2017).



Abbildung 7: diagonale Größe des Hexakopters F550 von DJI (Quan, 2017)

Die Größe des Chassis ergibt sich durch den diagonalen Abstand der Motorenachsen (siehe Abbildung 7). Die Chassisgröße beschränkt die Größe des Propellers, welche wiederum den maximalen Schub und die Nutzlastkapazität bestimmt.

Bei der Wahl des Materials für das Chassis werden die Dichte, die Steifigkeit und der Preis berücksichtigt. Während die Karbonfaser mit seiner geringen Dichte und hohen Steifigkeit in der oberen Preisklasse dominiert, bietet das Acryl-Kunststoff eine günstige Alternative mit Kompromissen bei der Steifigkeit (Quan, 2017).

Die Bauform des Multikopters variiert mit der Anzahl der Propeller. Die beliebtesten Bauformen stellen dabei Quadro-, Hexa- und Oktokopter dar (Quan, 2017). Diese sollen im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

Angetrieben wird der Multikopter von Motoren mit aufgesetzten Propellern, deren Geschwindigkeit von dem elektronischen Drehzahlregler (auf Englisch: ESC) gesteuert wird. Zusammen mit der Batterie bilden sie das Antriebssystem des Multikopters. Das Antriebssystem ist u.a. für die Schwebedauer, die Nutzlastfähigkeit, sowie die Flugeschwindigkeit und -distanz verantwortlich (Quan, 2017).

Gesteuert wird der Multikopter per Funk i.d.R. mit einer Frequenz von 72 MHz oder 2,4 GHz. Die Fernsteuerung erfolgt über einen Sender beim Piloten und einem Empfänger an dem Multikopter. Die Signale werden vom Pilot über die Fernsteuerung an den Empfänger des Kopters gesendet. Nach der Dekodierung der Signale werden die Befehle an die Flugsteuerung übertragen, welche die Haltung, die Position und die Flugbahn des Multikopters bestimmt. Die Flugsteuerung besteht hauptsächlich aus folgenden Komponenten: ein GPS-Empfänger, eine Trägheitsmesseinheit (auf Englisch: IMU), ein Ultraschall-Höhensensor und einen Mikrocomputer (Quan, 2017).

2.2.2 Bauformen des Multikopters

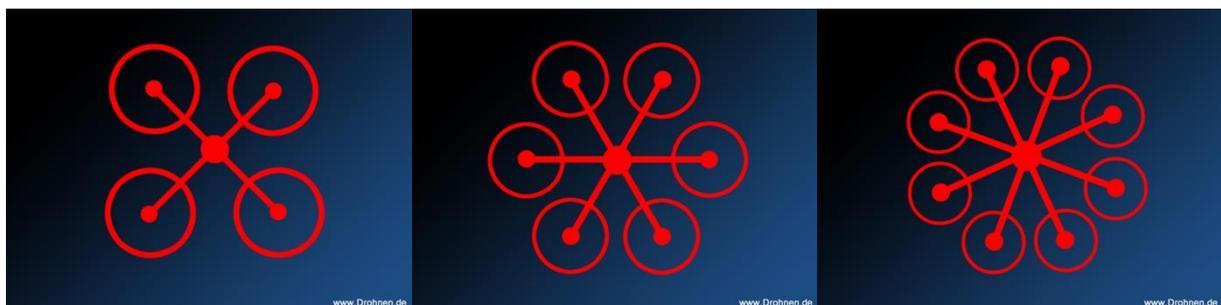


Abbildung 8: (von links nach rechts) Quadro-, Hexa-, Oktokopter (drohnen.de)

Quadrokooper:

Ein Quadrokooper besteht aus 4 Motoren, die auf einem symmetrischen Rahmen mit 4 Armen montiert sind, wobei jeder Arm senkrecht auf dem anderen steht (für X4-Konfiguration). Durch ein synchronisiertes Rotieren der 4 Motoren können verschiedene Flugmanöver erzielt werden. So kann durch ein gleichzeitiges Rotieren der Motoren mit einer gleichen Drehzahl der Quadrokooper zum Stehen in der Luft gebracht werden (Jeremia, Kuantama, & Pangaribuan, 2012). Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Massenverteilung zu legen. So hat die Position des Schwerpunkts eine erhebliche Auswirkung auf die Flugeigenschaften. Dieses Hintergrundwissen ist besonders bei der Anwendung von Multikooperen im Bauwesen nicht zu vernachlässigen, da Multikooper hier als Transportmittel dienen.

Ein weiterer Vorteil eines Quadrokooper liegt in seiner Kompaktheit und Einfachheit. Das geringere Eigengewicht verlängert die Akkulaufzeit und der kleinere Umfang ermöglicht dem Quadrokooper, durch schmale Pässe fliegen zu können (Agrawal & Shrivastav, 2013).

Hexakooper:

Ein Hexakooper besteht aus sechs Rotoren, welche in einer Ebene angeordnet sind (Abbildung 8). Die Funktionsweise ähnelt dem eines Quadrokooperen. Aufgrund der größeren Anzahl an Motoren erzielt ein Hexakooper eine höhere Hubkraft und ein ruhigeres Flugverhalten als ein Quadrokooper. Die Besonderheit eines Hexakooper liegt darin, selbst bei einem Ausfall eines Motors, eine sichere Landung zu gewährleisten (Agrawal & Shrivastav, 2013).

Oktokooper:

Ein Oktokooper besteht aus 8 Rotoren, welche auf einem ebenen Rahmen symmetrisch angeordnet sind. Er bietet die höchste Hubkapazität und Flugstabilität der hier aufgelisteten Modelle. Selbst bei einem Ausfall von bis zu 2 Motoren ist eine sichere Landung immer noch möglich. Aufgrund dieser Eigenschaft des Oktokooperen wird er als der zuverlässigste unter den Multikooperen angesehen. Jedoch ist der Oktokooper durch seine aufwändige Konstruktion der preislich und wartungstechnisch teuerste (Li-ang, 2016).

Koaxiale Bauformen:

Die koaxialen Bauformen der Y6- und X8-Kopter zeichnen sich durch eine höhere Hubkraft, aufgrund einer doppelten Anzahl an eingebauten Motoren, aus. Die Besonderheit der koaxialen Bauformen ist die Verwendung eines zweiten Motors je Arm. Dabei drehen die beiden Motoren je Arm in entgegengesetzte Richtungen. Somit besitzt eine koaxiale Bauform die Kompaktheit eines Tri- bzw. Quadropters und zusätzlich die „Fail-Safe-Eigenschaft“ eines Hexa- bzw. Oktokopters (Liang, 2016). Bei der Verwendung zweier identischer Propeller pro Arm muss, aufgrund einer gegenseitigen Beeinflussung, ein Verlust des Schubs berücksichtigt werden. So kann bei zwei identischen Propellern nur mit 1,6 Propellern je Arm gerechnet werden. Durch eine Kombination mit verschiedenen Motoren und Propellern kann der Wirkungsgrad des koaxialen Kopters verbessert werden (Quan, 2017).

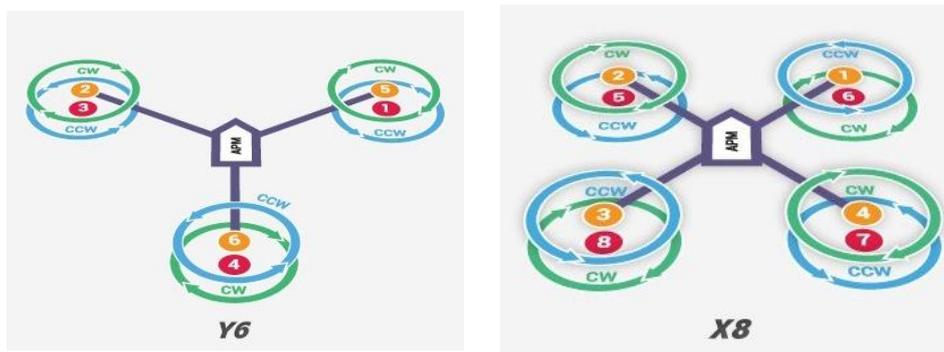


Abbildung 9: Y6- und X8-Bauform (Liang, 2016)

Jede Bauform des Multikopters hat ihre Vor- und Nachteile. Für den Einsatz beim Transport des Führungsseils sind jedoch Hexakopter und Oktokopter zu bevorzugen. Dies liegt einerseits an der sog. „Fail-Safe“ Eigenschaft der gewählten Multikopter. Damit wird die sichere Landung der Fluggeräte trotz Motorausfällen gewährleistet. Somit können die hohen Sicherheitsanforderungen auf Baustellen eingehalten werden.

Andererseits können Hexa- und Oktokopter mehr Nutzlast transportieren. Beispielsweise besitzt der DJI Matrice 600 Pro (Hexakopter) eine Nutzlast von 6 kg (DJI, 2017) oder der FREEFLY ALTA 8 (Oktokopter) eine Nutzlast von 9 kg (FREEFLY, 2016). Prinzipiell kann folgende Aussage getroffen werden. Die Anzahl der Rotoren beeinflusst direkt proportional den erzeugten Schub eines Kopters. Es muss jedoch beachtet werden, dass durch eine steigende Zahl an Motoren das Eigengewicht zunimmt und dadurch die Laufzeit sinkt (Liang, 2016).

2.2.3 Multikopter vs. Helikopter

Der Unterschied zwischen Helikopter und Multikopter liegt grundsätzlich in ihrer mechanischen Eigenschaft. Ein Helikopter wird von einem einzelnen Rotor angetrieben, wobei ein Multikopter, wie man vom Namen ableiten kann, von mehreren Rotoren angetrieben wird. Die Bewegung eines Multikopters wird durch eine Drehzahländerung der Rotoren erreicht. Dabei bleiben die Motorenachsen senkrecht zur Rahmenebene des Chassis. Im Gegensatz zum Multikopter, bleibt die Drehzahl des Rotors eines Helikopters konstant. Die Bewegung eines Helikopters wird durch eine Variierung der Neigung der Motorenachsen und des Propellerblatts erreicht. Wegen der konstanten Drehzahl des Rotors ist ein Helikopter effizienter als ein Multikopter. Jedoch überzeugt der Multikopter bzw. das UAS durch eine Einfachheit der Mechanik und verbesserte Flugsteuerung, weshalb der Multikopter bzw. das UAS in gewerblichen Anwendungen eine wachsende Rolle spielt. (Liang, 2015)

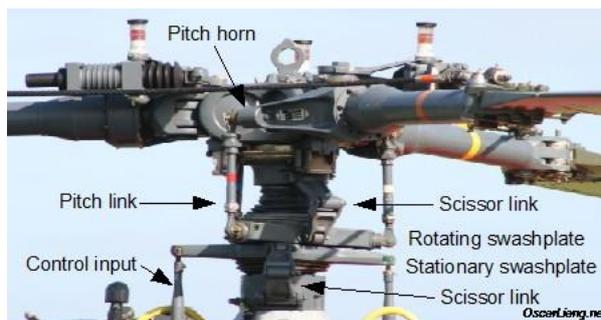


Abbildung 10: Rotorenmechanik eines Helikopters (Liang, 2015)



Abbildung 11: Motor eines Multikopters mit Festpropelle (Liang, 2015)

2.3 Seilstatik

Für die Anwendung des UASs als Träger des Führungsseils bildet die Kenntnis der Seilstatik den Grundstein. In der Literatur erfolgte bisher noch kein reales Beispiel der Verwendung eines UAS, welches mit konkretem Rechenweg dargestellt wurde. Den größten Einflussfaktor auf das UAS bildet die Seilkraft. Diese ist abhängig von dem Winkel der Schusslinie gegenüber der Horizontalen und des Durchhangs des Seils. Außerdem muss in der Flugphase auf die innere Tragfähigkeit des Seils geachtet werden. Die Seilkraft soll im Folgenden hergeleitet werden, um im Anschluss Berechnungen anstellen zu können.

Für das Konzept werden folgende Randbedingungen angenommen (Palkowski, 1990):

- Das Seil ist ideal biegsam, es kann nur Normalzugkräfte übertragen
- Windlast und Schneelast werden vernachlässigt
- Temperatureinflüsse auf das Seil werden vernachlässigt
- Es wird nur das Seileigengewicht berücksichtigt

Abkürzungen:

- g Eigengewicht
- q Linienlast
- f Seildurchhang
- s Seillänge
- S Seilkraft
- H Horizontaler Anteil der Seilkraft
- E E-Modul des Seils
- A Querschnittsfläche des Seils

2.3.1 Seilkraft für Seile mit horizontaler Sehne

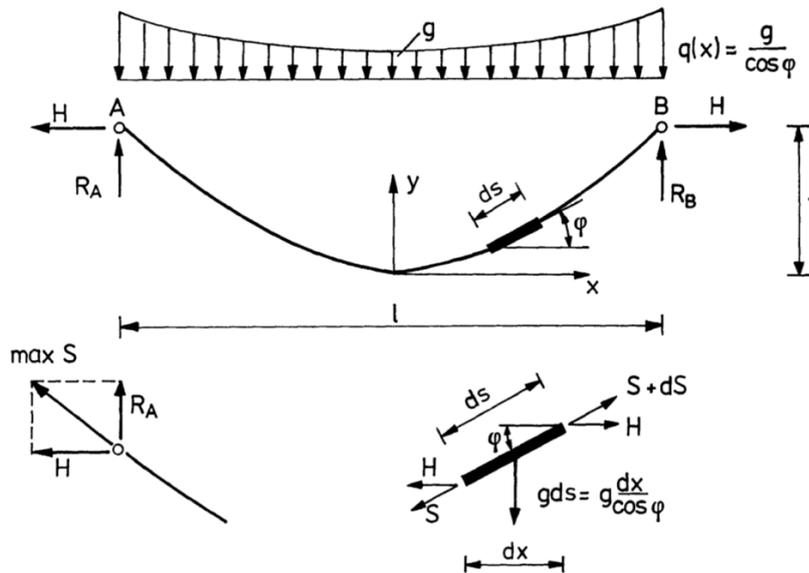


Abbildung 12: Seil unter Wirkung des Eigengewichts (Palkowski, 1990)

Abbildung 12 zeigt ein horizontales biegsames Seil unter der Einwirkung des Eigengewichts g . Die auf die Seilsehne bezogene vertikale Belastung beträgt in diesem Fall (Palkowski, 1990):

$$q(x) = \frac{g}{\cos \varphi} . \quad (2.1)$$

Unter Wirkung der Belastung $q(x)$ nimmt die Seildurchhangskurve in den Koordinaten x, y folgende Gleichung an (vgl. Katschurin W.K.):

$$y = k \left(\cosh \frac{x}{k} - 1 \right) \quad (2.2)$$

mit

$$k = \frac{H}{g} . \quad (2.3)$$

Gleichung (2.2) stellt die bekannte Kettenlinie dar. Setzt man in (2.2) $x = l/2$ ein, so erhält man die Formel für den maximalen Durchhang des Seils in Feldmitte (vgl. Palkowski):

$$f = y \left(\frac{l}{2} \right) = k \left(\cosh \frac{l}{2k} - 1 \right) . \quad (2.4)$$

Mit (2.2) können die Ordinatenwerte y des Seildurchhangs, in Abhängigkeit des horizontalen Anteils der Seilkraft H , bestimmt werden. Diese Kraft wird aus der sogenannten Seilgleichung ermittelt.

Herleitung der Seilgleichung

(Palkowski, 1990)

Die Länge des Seils bestimmt aus:

$$s = \int_A^B \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (2.5)$$

Die erste Ableitung der Gleichung (2.2) ist:

$$y' = \sinh \frac{x}{k} . \quad (2.6)$$

Setzt man Gleichung (2.6) in Gleichung (2.5) ein, so ergibt sich:

$$s = \int_A^B \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{x}{k}} dx = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \cosh \frac{x}{k} dx . \quad (2.7)$$

Die Auswertung des Integrals in Gleichung (2.7) ergibt:

$$s = 2k \sinh \frac{lg}{2k} , \quad (2.8)$$

oder unter Berücksichtigung von Gleichung (2.3):

$$s = \frac{2H}{g} \sinh \frac{lg}{2H} \quad (2.9)$$

Zwischen den Längen des Seiles im Ausgangs- und Endzustand besteht folgende Beziehung:

$$s = s_0 + \Delta s \quad (2.10)$$

wobei

s Länge des Seils im Endzustand,

s_0 Länge des Seils im Ausgangszustand (für $g = 0$),

Δs elastische Verlängerung des Seils,

ist.

Die elastische Verlängerung des Seils ergibt sich zu:

$$\Delta s = \int_0^s \varepsilon ds = \frac{H}{EA} \int_0^1 (1 + y'^2) dx . \quad (2.11)$$

wobei:

E Elastizitätsmodul des Seils,

A Querschnitt des Seils

ist.

Setzt man Gleichung (2.6) in Gleichung (2.11) ein, ergibt sich nach der Auswertung des Integrals und nach Umformen die elastische Verlängerung des Seils zu:

$$\Delta s = \frac{H^2}{EA g} \left(\frac{lg}{2H} + \frac{1}{4} \sinh \frac{2lg}{H} \right) . \quad (2.12)$$

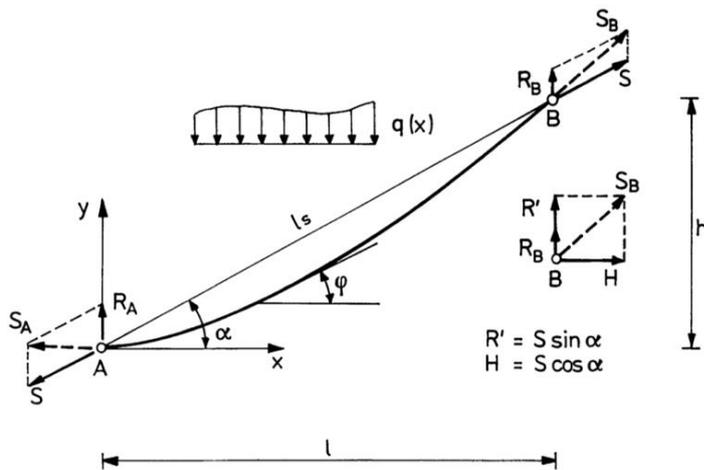
Wenn man in Gleichung (2.10) die Gleichungen (2.9) und (2.12) einsetzt, erhält man die exakte Seilgleichung für Seile mit horizontaler Sehne:

$$\frac{2H}{g} \sinh \frac{lg}{2H} = s_0 + \frac{H^2}{EA g} \left(\frac{lg}{2H} + \frac{1}{4} \sinh \frac{2lg}{H} \right) . \quad (2.13)$$

Diese Gleichung kann für beliebig große Seildurchhänge und Seillängen verwendet werden. Durch die Bestimmung des horizontalen Anteils der Seilkraft H lassen sich die Ordinatenwerte der Seilkurve mittels Gleichung (2.2) ermitteln.

2.3.2 Seilkraft für Seile mit schräger Sehne

(Palkowski, 1990)



- S Seilkraft in der Schusslinie
- S_B maximale Seilkraft am Knoten
- H horizontale Seilkraft
- R_A Auflagerkraft am A
- R_B Auflagerkraft am B
- q Linienlast
- l Länge
- h Höhe

Abbildung 13: Seil mit schräger Sehne (Palkowski, 1990)

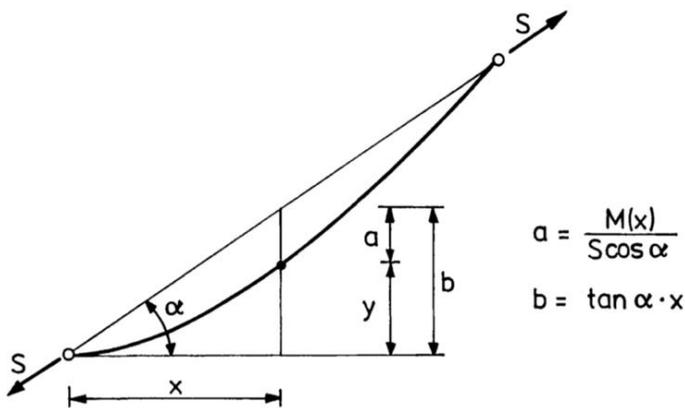


Abbildung 14: Darstellung der Seilordinate y (Palkowski, 1990)

Gemäß Abbildung 14 soll im Folgenden ein schräges Seil unter der Belastung $q(x)$ betrachtet werden. Die Auflagerkräfte werden hier in Form einer in der Seilschusslinie wirkenden Kraft S und der vertikalen Kräfte R_A und R_B angenommen. Eine solche Annahme der Auflagerkräfte hat den Vorteil, dass die vertikalen Kräfte R_A und R_B den Auflagerkräften eines Balkens mit der Stützweite l entsprechen (Palkowski, 1990).

Für das in Bild 2.2 dargestellte schräge Seil gilt die allgemeine Beziehung:

$$M - S \cdot \sin \alpha \cdot x + S \cos \alpha \cdot y = 0 \tag{2.14}$$

Wobei M das Moment infolge der Belastung $q(x)$, analog dem Moment eines Balkens mit der Stützweite l , darstellt.

Gleichung (2.14) drückt die Bedingung aus, dass das Biegemoment in jedem Punkt des Seiles gleich Null ist. Die Auflösung dieser Gleichung nach y ergibt:

$$y = \tan \alpha \cdot x - \frac{M}{S \cdot \cos \alpha} \quad (2.15)$$

Die graphische Darstellung der Gleichung (2.15) wird in Abbildung 14 gezeigt. Ist die Seilkraft S in der Schusslinie bekannt, so kann man aus Gleichung (2.15) alle Ordinatenwerte des Seils ermitteln. Die maximale Zugkraft im Seil ergibt sich zu:

$$\max S = S_B = \sqrt{(S \cos \alpha)^2 + (R_B + S \sin \alpha)^2} \quad (2.16)$$

Herleitung der Seilgleichung mittels der Methode der Querkraft

Grundlage der Seilgleichung ist das Verhältnis zwischen den Seillängen im Ausgangs- und Endzustand. Die Länge des Seils s im Endzustand unter Wirkung des Eigengewichts errechnet sich zu:

$$s = \int_0^1 \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (2.17)$$

Für die Ableitung der Ordinate wird an dieser Stelle Gleichung (2.15) verwendet.

$$y' = \tan \alpha - \frac{1}{S \cos \alpha} \cdot \frac{dM}{dx} = \tan \alpha - \frac{Q}{S \cos \alpha}, \quad (2.18)$$

wobei Q der gedachten Querkraft infolge der Belastung $q(x)$, analog zur Querkraft für einen Balken mit der Stützweite l , entspricht.

Setzt man Gleichung (2.18) in Gleichung (2.17) ein, so ergibt sich:

$$s = \int_0^1 \sqrt{1 + \left(\tan \alpha - \frac{Q}{S \cos \alpha} \right)^2} dx. \quad (2.19)$$

Die elastische Verlängerung des Seils, gemäß Gleichung (2.11), beträgt:

$$\Delta s = \frac{S \cos \alpha}{EA} \int_0^1 \left[1 + \left(\tan \alpha - \frac{Q}{S \cos \alpha} \right)^2 \right] dx. \quad (2.20)$$

Gleichung (2.10) nimmt unter Berücksichtigung der Gleichungen (2.19) und (2.20) folgende Form an:

$$\int_0^1 \sqrt{1 + \left(\tan \alpha - \frac{Q}{S \cdot \cos \alpha} \right)^2} dx = s_0$$

$$+ \frac{S \cdot \cos \alpha}{EA} \int_0^1 \sqrt{1 + \left(\tan \alpha - \frac{Q}{S \cdot \cos \alpha} \right)^2} dx . \quad (2.21)$$

Bemerkung:

Gleichung (2.21) ist die exakte Seilgleichung. Sie gilt für beliebige vertikale Belastungen $q(x)$ und berücksichtigt beliebig große Seildurchhänge. Ihre Anwendung bereitet in der Praxis jedoch einige Schwierigkeiten, da die exakte Lösung nur auf dem Weg der numerischen Integration möglich ist. Dadurch wird oft auf eine Näherungslösung wie folgt zurückgegriffen:

$$S^3 + S^2 EA \left[1 - \frac{1}{s_0} (l_s - \alpha_t \Delta t s_0) \right] = \frac{EA \cos \alpha}{2s_0} \int_0^1 Q^2 dx . \quad (2.22)$$

Für den Sonderfall $q(x)=\text{konstant}$ lässt sich die Gleichung vereinfachen:

$$S^3 + S^2 EA \left[1 - \frac{1}{s_0} (l_s - \alpha_t \Delta t s_0) \right] = \frac{EA \cos \alpha q^2 l^3}{24s_0} . \quad (2.23)$$

Dabei ist der Durchhang f in Feldmitte:

$$f = \frac{u}{\cos \alpha} . \quad (2.24)$$

mit

$$u = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot S} . \quad (2.25)$$

Ein ausführliches Rechenbeispiel, welches auf der Akashi-Kaikyo-Brücke basiert, wird in Kapitel 4.3 vorgestellt.

2.4 Das Ausgleichsgewicht und die Kraftverteilung

Die Fortbewegung des UASs erfolgt durch eine Neigung des Fluggerätes (Kotarski, Benic, & Krznar, 2016). Um ein Kräftegleichgewicht am Lastpunkt zu erreichen, muss der Neigungswinkel erhalten bleiben. Infolgedessen steht die Kraftverteilung der Belastungen und des erzeugten Schubs des Fluggerätes im Mittelpunkt. Es wird angenommen, dass die Luftreibung vernachlässigt wird.

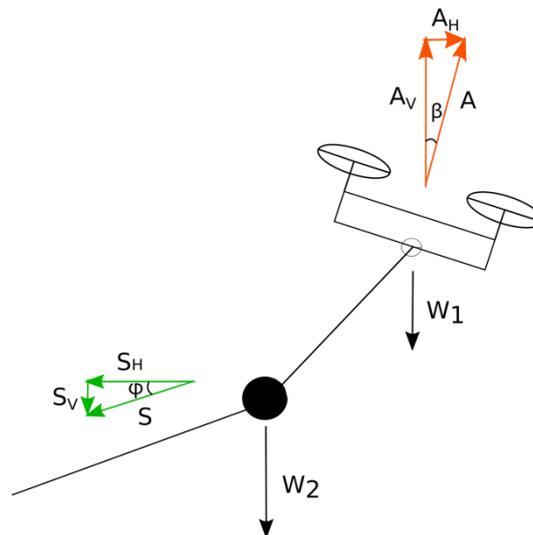


Abbildung 15: Kraftverteilung am Knoten mit Ausgleichsgewicht

Als Besonderheit des Systems ist zu beachten, dass sowohl die Auftriebskraft A_V als auch die Vortriebskraft A_H größer sein müssen, als die Summen aller vertikalen bzw. horizontalen Belastungen (rotes Kräftedreieck). Wie weiter oben bereits beschrieben, beeinflusst eine Änderung des Winkels φ , zwischen der Horizontalen und der Tangente des Seils, die Seilkraft am Knoten (grünes Kräftedreieck). Unter Beachtung der genannten Aspekte ist es notwendig, die Kraftverteilung am Punkt B (Abbildung 16) genauer zu betrachten.

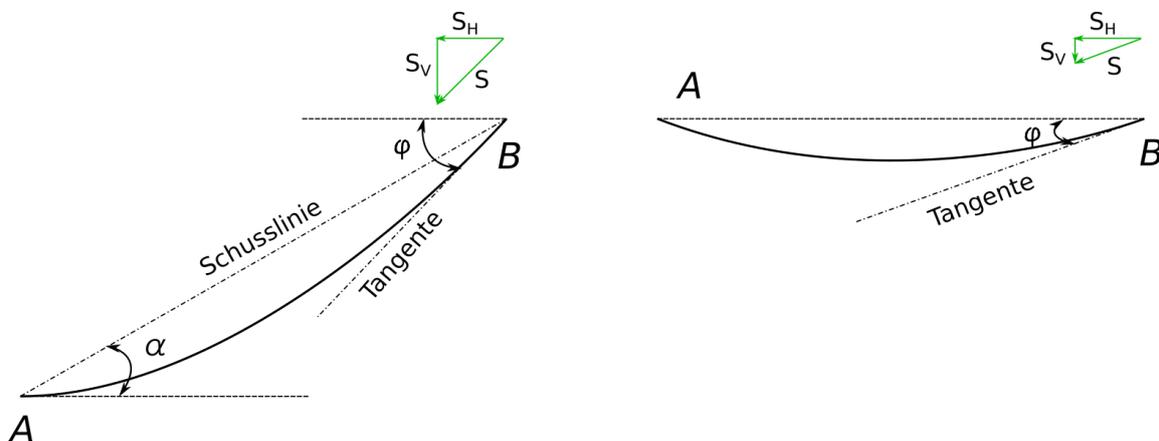


Abbildung 16: Systemdarstellung am Seil mit schräger und horizontaler Sehne

Die Seilkraft am Knoten B kann in einen horizontalen S_H und vertikalen S_V Anteil der Seilkraft S , mit dem Winkel φ , aufgeteilt werden. Der gesamte Schub A kann ebenfalls in einen vertikalen Anteil, den Auftrieb A_V , und einen horizontalen Anteil, den Vortrieb A_H , mittels des Neigungswinkels β , aufgeteilt werden.

Die Kraft-Winkel-Beziehung wird wie folgt hergeleitet:

Der gesamte Schub A besteht aus dem vertikalen Auftrieb A_V und dem Vortrieb A_H :

$$A = \frac{A_H}{\sin \beta} = \frac{A_V}{\cos \beta}. \quad (2.26)$$

Die Seilkraft S kann in ihren vertikalen S_V und horizontalen Anteil S_H aufgeteilt werden:

$$S = \frac{S_H}{\cos \varphi} = \frac{S_V}{\sin \varphi}. \quad (2.27)$$

Die Randbedingung des Systems ergibt sich zu:

$$A_H \geq S_H, \quad (2.28)$$

und

$$A_V \geq S_V + W_1 + W_2. \quad (2.29)$$

Der erforderliche gesamte Schub lautet also:

$$A = \frac{W_{ges} + S_V}{\cos \beta}, \quad (2.30)$$

mit

$$W_{ges} = W_1 + W_2. \quad (2.31)$$

Mit den Gleichungen (2.26) und (2.27) erhält man:

$$\frac{A_H}{\sin \beta} = \frac{W_{ges} + S \cdot \sin \varphi}{\cos \beta}, \quad (2.32)$$

$$\frac{S \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta}{\sin \beta} = W_{ges} + S \cdot \sin \varphi. \quad (2.33)$$

Ein Umformen der Gleichung (2.32) nach W_{ges} liefert:

$$W_{ges} = \frac{S \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \beta - \sin \varphi \cdot \sin \beta)}{\sin \beta}. \quad (2.34)$$

Da $\cos(\varphi + \beta) = \cos \varphi \cdot \cos \beta - \sin \varphi \cdot \sin \beta$ ist, kann geschrieben werden:

$$W_{ges} = \frac{S \cdot \cos(\varphi + \beta)}{\sin \beta}, \quad (2.35)$$

Diese Formel gilt auch ohne eine Verwendung eines Ausgleichsgewichts, denn das Seil wirkt zwischen Ausgleichsgewicht und dem UAS wie ein Pendelstab mit Zugbeanspruchung. Da die Dehnung des Seils zwischen dem Ausgleichsgewicht und dem UAS vergleichsweise gering ist, bleibt die Kraft-Winkel-Beziehung erhalten. Zur Veranschaulichung des Systems soll folgende Abbildung dienen:

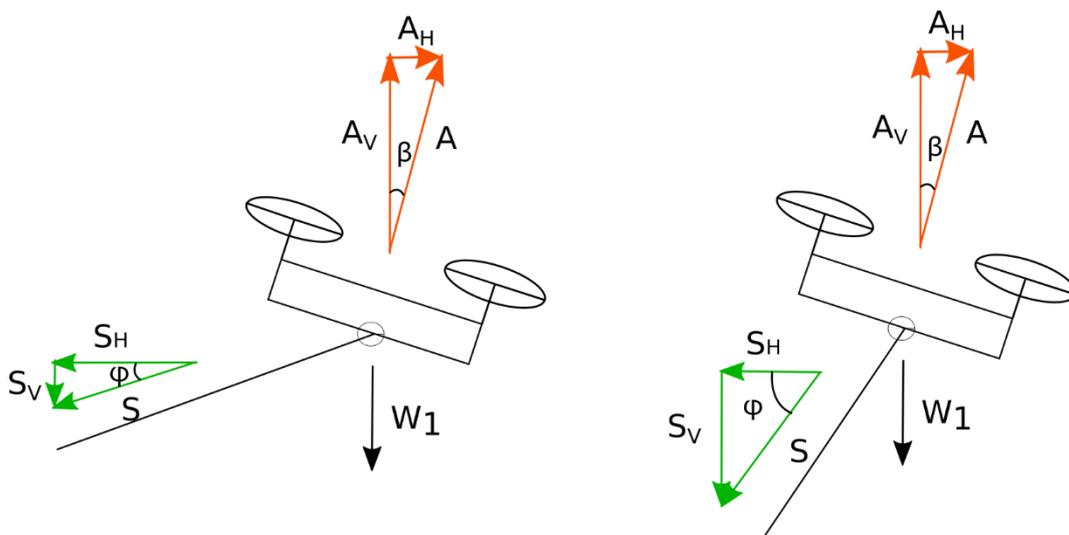


Abbildung 17: Kraftverteilung ohne Ausgleichsgewicht unter dem Einflusswinkel φ

Die Gleichgewichtsgleichung lautet analog zur Gleichung (2.35):

$$W_1 = \frac{S \cdot \cos(\varphi + \beta)}{\sin \beta}. \quad (2.36)$$

Die erforderliche Auftriebs- und Vortriebskraft ergibt sich zu:

$$A_V = W_1 + S_V. \quad (2.37)$$

$$A_H = S_H. \quad (2.38)$$

Wie anhand Abbildung 17 ersichtlich ist, hat der Winkel φ einen maßgebenden Einfluss auf die Anteile S_V und S_H der Seils. Der Winkel φ wird dabei direkt vom Durchhang des Seils beeinflusst. Um einen vorgegebenen Sicherheitsabstand einzuhalten, muss der Durchhang sowie der dadurch resultierende Winkel φ geringgehalten werden. Der Winkel β sollte während des Fluges mit einer konstanten Geschwindigkeit (Energieeffizientes Fliegen) nicht verändert werden (Öhlund, 2017), da die Geschwindigkeit in einem direkten Verhältnis zum Winkel β steht. Dadurch müssen zwei Fälle unterschieden werden.

Fall 1 - horizontaler Flug:

Beim horizontalen Flug, z.B. von einem Pylon zum nächsten, überwiegt der horizontale Anteil der Seilkraft S_H . Um einen Vortrieb zu erhalten muss die Vortriebskraft A_H größer S_H sein. Da jedoch der Winkel β des UASs in einem gewissen Bereich begrenzt ist, überwiegt A_V stets A_H . Dadurch folgt eine Flugkurve, welche schräg nach oben zeigt. Um den zusätzlichen Auftrieb zu kompensieren, ist ein Ausgleichsgewicht W_2 erforderlich.

Fall 2 - schräger Flug:

Anders als beim horizontalen Flug ist beim schrägen Flug, also vom Anker zum ersten Pylon, der zusätzliche Auftrieb vorteilhaft. Somit ist für diesen Fall, gemäß Kapitel 3, meistens kein zusätzliches Ausgleichsgewicht erforderlich.

Für einen energieeffizienten Einsatz von UASs sollten Ausgleichsgewichte möglichst gering gehalten werden. Eine Möglichkeit besteht dabei in der Variation des Winkels β für die einzelnen Fälle. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass der Winkel β sich direkt auf die Flugstabilität des UAS auswirkt.

Folgendes Diagramm soll den Einfluss des Winkels β auf den Auftrieb des UAS darstellen. Dabei wurden alle anderen Faktoren konstant gehalten.

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Eigengewicht des Kopters = 4 kg
- 1 mm Polyamid-Seil mit 3 g/m
- Hauptspannweite = 1000 Meter
- E-Modul des Seils = 1500 N/mm²

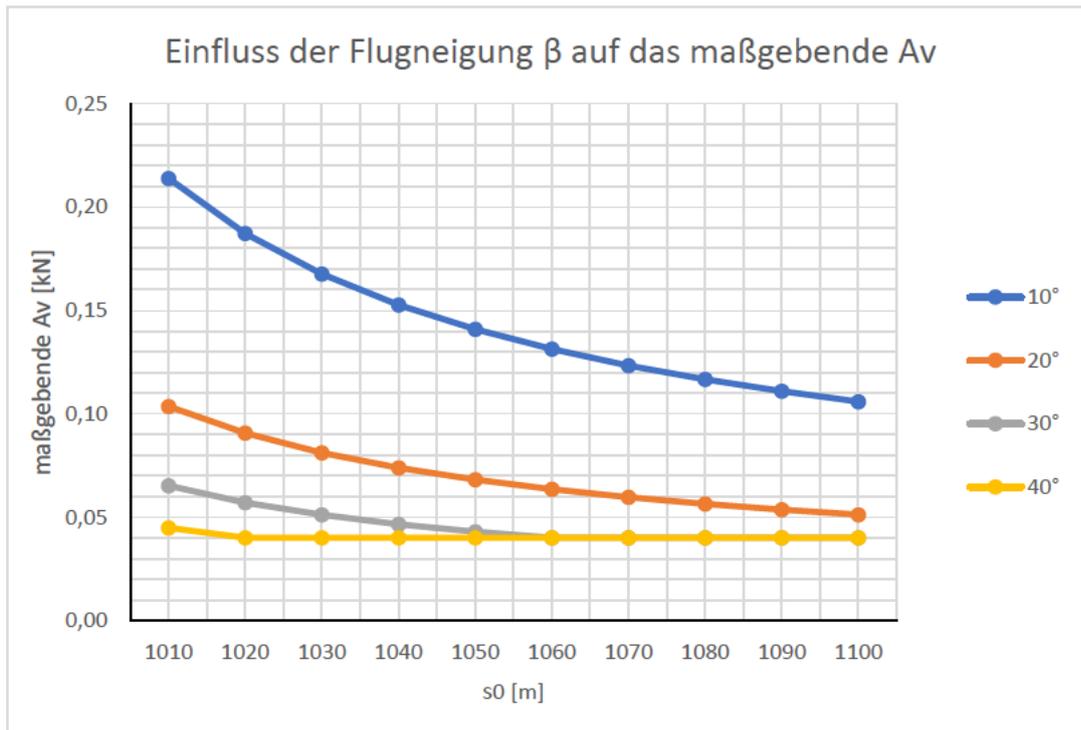


Abbildung 18: Einfluss der Flugneigung auf maßgebende Auftriebskraft

Bei der Wahl des UASs ist zu beachten, dass der gesamte erforderliche Schub nur dem Minimum des Schubs in der Realität entspricht. Der Grund hierfür ist die notwendige Manövrierfähigkeit des UASs, welche ebenfalls durch Schub erreicht wird.

3 Messmethodenentwicklung

3.1 Programm zur Berechnung

Die Berechnung der Seilkräfte mit den in Kapitel 2 vorgestellten Formeln beinhaltet eine Angabe der Seilaustragslänge s_0 . Die Seilaustragslänge s_0 beeinflusst sowohl den Durchhang des Seils, als auch die Seilkräfte am Knoten B (Abbildung 16). Diese muss in der Praxis durch wiederholte Versuche bestimmt werden. Um den Vorgang der iterativen Berechnung zu erleichtern, wird ein Excel-Programm mittels VBA (Visual Basic for Applications) erstellt.

Das Programm besteht aus zwei Teilen.

Im ersten Teil, welcher „Seilgleichung“ genannt wird, erfolgt die Eingabe aller Berechnungsparameter durch den Benutzer. Dabei werden u.a. Angaben zum Seil, zur Bauwerksgeometrie und Flugneigung des UASs eingegeben. Die Ergebnisse können den blau eingefärbten Zellen entnommen werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Input:								
2	Spannweite (m)	Durchmesser (mm)	E (N/mm ²)	g (g/m)	s0l	Δs0	W1 (kg)	β	
3	1196	2,00	4000,00	4,500	1,01	0,01	2,50	30,0	
4	Output:								
5	Spannweite l (m)	Austragslänge s0 (m)	g (kN/m)	EA(kN) automatic	l*g (kN)	Gleichung_Links	Gleichung_Rechts	links-rechts	H (kN)
6	1196,0000	1207,96000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,21274565428506E+03	1,21274565426120E+03	-2,38603661273373E-08	0,09303809575073
7	1196,0000	1219,92000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,22388280772434E+03	1,22388280764458E+03	-7,97595021140296E-08	0,07220102800622
8	1196,0000	1231,88000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,23548514387673E+03	1,23548514389045E+03	1,37224560603499E-08	0,06075975398318
9	1196,0000	1243,84000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,24730257557282E+03	1,24730257551780E+03	-5,50273853150429E-08	0,05338169211112
10	1196,0000	1255,80000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,25924689128290E+03	1,25924689136859E+03	8,56930455483962E-08	0,04814757156285
11	1196,0000	1267,76000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,27127992267400E+03	1,27127992293042E+03	2,56412249655114E-07	0,04419645049241
12	1196,0000	1279,72000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,28338309689837E+03	1,28338309639608E+03	-5,02287775816512E-07	0,04108148994226
13	1196,0000	1291,68000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,29554688819942E+03	1,29554688809988E+03	-9,95394202618627E-08	0,03854591952721
14	1196,0000	1303,64000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,30776649992371E+03	1,30776649968828E+03	-2,35434754358721E-07	0,03643073667525
15	1196,0000	1315,60000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,32003985423720E+03	1,32003985428871E+03	5,15176452609012E-08	0,03463169439640
16	1196,0000	1327,56000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,33236658174363E+03	1,33236658085221E+03	-8,91417130333139E-07	0,03307729716972
17	1196,0000	1339,52000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,34474746348906E+03	1,34474746348906E+03	-1,57261638378259E-07	0,0317166944218
18	1196,0000	1351,48000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,35718413035920E+03	1,35718412906969E+03	-1,28951342048822E-06	0,03051261556208
19	1196,0000	1363,44000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,36967886295532E+03	1,36967886387709E+03	9,21770379136433E-07	0,02943704724478
20	1196,0000	1375,40000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,38223450774888E+03	1,38223450718483E+03	-5,64051106266561E-07	0,02846847582416
21	1196,0000	1387,36000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,39485438918771E+03	1,39485438923098E+03	4,32671640737681E-08	0,02759007245003
22	1196,0000	1399,32000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,40754230150295E+03	1,40754230157472E+03	7,17659531801473E-08	0,02678845750627
23	1196,0000	1411,28000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,42030248524427E+03	1,42030248678550E+03	1,54123085849278E-06	0,02605284235512
24	1196,0000	1423,24000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,43313964569684E+03	1,43313964525326E+03	-4,43580120190745E-07	0,02537441656127
25	1196,0000	1435,20000	4,50E-05	12,566	0,053820	1,44605895468743E+03	1,44605895287066E+03	-1,81677273758396E-06	0,02474590424770

Abbildung 19: Tabelle „Seilgleichung“

Der zweite Teil des Programms, welcher „Kraftverteilung“ heißt, dient der Ausgabe der Ergebnisse bzgl. des Seils, sowie der Leistungsanforderung des UASs.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
4	g	l	S0	H	RB	S	k	f	l/2k	COSH	φ	β
5	kN/m	m	m	kN	kN	kN		m			Grad	Grad
6	4,50E-05	1196	1208	7,05E-02	2,72E-02	7,55E-02	1,57E+03	115,57	3,818E-01	1,074E+00	21,09	30
7	4,50E-05	1196	1220	6,10E-02	2,74E-02	6,69E-02	1,36E+03	134,01	4,410E-01	1,099E+00	24,22	30
8	4,50E-05	1196	1232	5,42E-02	2,77E-02	6,09E-02	1,21E+03	151,42	4,962E-01	1,126E+00	27,07	30
9	4,50E-05	1196	1244	4,92E-02	2,80E-02	5,66E-02	1,09E+03	167,81	5,474E-01	1,154E+00	29,65	30
10	4,50E-05	1196	1256	4,52E-02	2,83E-02	5,33E-02	1,00E+03	183,31	5,953E-01	1,182E+00	32,01	30
11	4,50E-05	1196	1268	4,20E-02	2,85E-02	5,08E-02	9,34E+02	198,03	6,401E-01	1,212E+00	34,16	30
12	4,50E-05	1196	1280	3,94E-02	2,88E-02	4,88E-02	8,76E+02	212,08	6,824E-01	1,242E+00	36,14	30

Abbildung 20: 1. Ausschnitt der Tabelle „Kraftverteilung“

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
4	β	SV	SH	Wges	W1	W2	min. AH	Av'	min. Av	gew. Av	ges. A
5	Grad	kN	kN	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
6	30	2,72E-02	7,05E-02	9,49	2,50	6,99	7,05	12,21	9,516	12,206	14,09
7	30	2,74E-02	6,10E-02	7,82	2,50	5,32	6,10	10,57	7,851	10,569	12,20
8	30	2,77E-02	5,42E-02	6,62	2,50	4,12	5,42	9,39	6,650	9,394	10,85
9	30	2,80E-02	4,92E-02	5,72	2,50	3,22	4,92	8,51	5,744	8,514	9,83
10	30	2,83E-02	4,52E-02	5,00	2,50	2,50	4,52	7,83	5,033	7,830	9,04
11	30	2,85E-02	4,20E-02	4,43	2,50	1,93	4,20	7,28	4,457	7,281	8,41
12	30	2,88E-02	3,94E-02	3,95	2,50	1,45	3,94	6,83	3,980	6,830	7,89

Abbildung 21: 2. Ausschnitt der Tabelle "Kraftverteilung"

Die Ermittlung der Ergebnisse erfolgt in einem zusätzlichen VBA Skript. Dieses ermöglicht pro Berechnungsausführung eine gleichzeitige Ergebnisermittlung für 20 unterschiedliche Seilauflängungen. Dadurch wird ein sinnvoller Überblick über die charakteristischen Werte und Anforderungen des Systems erreicht.

```

Sub seilgleichung_solving_horizontal()
    For i = 6 To 25
        SolverReset
        OBJSTRING = "$H$" & i
        VARSTRING = "$I$" & i
        SolverOK SetCell:=Range(OBJSTRING), MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:=VARSTRING
        SolverSolve UserFinish:=True

        Next
    End Sub

```

Abbildung 22: VBA-Skript zur Tabelle "Seilgleichung"

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das oben beschriebene Programm zur Berechnung der Seilkräfte und Kraftverteilung benutzt.

3.2 Messversuche

In der Praxis unterliegen das Flugverhalten und die Flugdauer des UASs stark den Wetterbedingungen (Dandois, Olano, & Ellis, 2015). Zur Kontrolle der berechneten Werte wird ein Vergleichsversuch mit Hilfe einer DJI Phantom 4 Drohne, welche vom Lehrstuhl Computergestützte Modellierung und Simulation zur Verfügung gestellt wird, durchgeführt. Es wird angenommen, dass die Drohne beim Versuch im S-mode geflogen wird. Somit kann die maximale Flugneigung erreicht werden.

Die Phantom 4 vom Hersteller DJI besitzt folgende technische Daten (DJI, 2016):

- Bauform: Quadrocopter
- Eigengewicht: 1380 Gram
- diagonale Größe: 350 mm
- maximale Geschwindigkeit: 20 m/s
- maximale Flugdauer: ca. 28 Minuten
- unterstützte Systeme: GPS/GLONASS
- maximale Neigung in
 - S-mode: 42°
 - A-mode: 35°
 - P-mode: 15°

Der Begriff S-mode beschreibt den Sport-Modus. In diesem Modus wird die Geschwindigkeit und Manövrierfähigkeit der Drohne erhöht. Im A-mode (Attitude) werden die GPS-Signale abgeschaltet. Die Flughöhe wird in diesem Modus mittels eines Barometers bestimmt. Im P-mode (Position) sind alle Sensoren eingeschaltet. Dadurch erfolgt eine genaue und schnelle Lokalisierung der Position der Drohne (DJI, 2016).

Beim Versuch wird ein Polyamidseil vom Hersteller Kanirope verwendet, welches folgende technische Daten besitzt (Kanirope):

- Durchmesser: 3 mm
- Bruchlast: 155 kg
- Eigengewicht: 5,1 g/m
- E-Modul Polyamid: 3200 N/mm²



Abbildung 23: DJI Phantom 4 (DJI)



Abbildung 24: Polyamidseil (Kanirope)

Der Messversuch besteht aus 2 Teilen. Im ersten Teil erfolgt ein Handversuch, bei welchem die horizontale Seilkraft am Knoten mit einer Federwaage gemessen wird. Außerdem wird in diesem Teil der Durchhang in Feldmitte gemessen. Im zweiten Teil wird mit der Phantom 4 versucht die Ergebnisse des Handversuchs zu wiederholen.

3.2.1 Seilkraftmessung

Die Seilkraftmessung fand zunächst vor dem Nordgebäude der Technischen Universität München statt. Die Testlänge des Seils betrug 50 m. Das Seil wurde für den Handversuch auf einer Höhe von 2,0 m über dem Boden gespannt. An einem Ende des Seils wurde die horizontale Seilkraft mit einer Federwaage gemessen. Außerdem erfolgte eine Messung des Seildurchhangs in der Mitte des Seils. Ein Vergleich des gemessenen und berechneten Durchhangs kann in Tabelle 3 eingesehen werden.



Abbildung 25: Messmethode Seilkraft

Aus der Messung haben sich folgende Werte ergeben:

l (m)	H (N)	f (m)	Soll-f (m)	Abweichung
50,0	25,0	1,00	0,64	56,3 %
50,0	15,0	1,60	1,06	50,9 %
50,0	8,00	2,00	1,99	0,5 %

Tabelle 3: Seilmessung per Hand im Vergleich mit Soll-Werten

Die Messwerte weisen bei kleinen Durchhängen eine große Abweichung auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei geringen Durchhängen eine hohe Zugkraft entsteht. Da bei diesem Versuch die Seile von Menschen gehalten bzw. gespannt wurden, konnte rein aus physikalischer Sicht nicht genug Kraft aufgewendet werden um den Solldurchhang zu erzielen. Wie jedoch in der Tabelle 3 zu sehen ist, wurde beim Versuch mit einem großen Solldurchhang eine sehr geringe Abweichung erzielt.

Im zweiten Teil des Versuches wird der Mensch durch das UAS ersetzt. Dabei fliegt das UAS im S-mode und erreicht damit eine maximale Flugneigung von $\beta = 42$ Grad. Die mit dem oben vorgestellten Programm ermittelten Werte können Tabelle 4 entnommen werden. Der Versuch dient dabei zur Bestätigung der ermittelten Werte.

H (N)	β (°)	f (m)	AGG (kg)	min. A (N)
25,0	42	0,64	1,25	37,4
15,0	42	1,06	0,14	22,4
8,00	42	1,99	NN	16,1

Tabelle 4: Kraftverteilung in S-mode

AGG: Ausgleichsgewicht; NN: nicht notwendig

3.2.2 Testflug

Der Quadrocopter Phantom 4 von der Firma DJI wird als Luftbildfotografie-Drohne hergestellt (DJI, 2016). Da der Hersteller keine Angabe zur Nutzlast macht, muss zunächst in einer Testreihe die maximal mögliche Nutzlast des Quadrocopters ermittelt werden. Diese ist notwendig, um den maximalen Schub des UAS zu ermitteln.



Abbildung 26: Messung des maximalen Schubs

Zunächst wird der Kopter mit der Federwaage verbunden. Dabei wird die Federwaage im Schwerpunkt des Kopters befestigt. Bei der Ermittlung des maximalen Schubs befindet sich der Kopter im S-Mode. Um den maximalen Schub zu ermitteln, wird der Kopter unter Volllast vertikal geflogen. Dadurch entspricht der sich einstellende Auftrieb dem maximalen Schub.

Nach der Testreihe wurde festgestellt, dass der Phantom 4 eine zusätzliche Auftriebskraft von 10 N erzeugen kann ($1 \text{ kg} = 10 \text{ N}$). Mit dem Eigengewicht von 1380 g führt dies zu dem maximalen Schub von 23,80 N. Mit einer Neigung von $\beta = 42^\circ$ kann der Kopter somit einen Vortrieb A_H von 15,95 N und einen Auftrieb A_V von 17,69 N erzeugen. Damit kann der erste Fall in Tabelle 4 leistungstechnisch nicht erzielt werden.

Der Testflug fand nachmittags am 16. März. 2018 an der „Alten Pinakothek“, in München, statt. Die Außentemperatur schwankte zwischen 8 und 11 Grad Celsius. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in München betrug 18 km/h (5 m/s) aus westlicher Richtung. Es gab keinen Niederschlag (timeanddate.de).

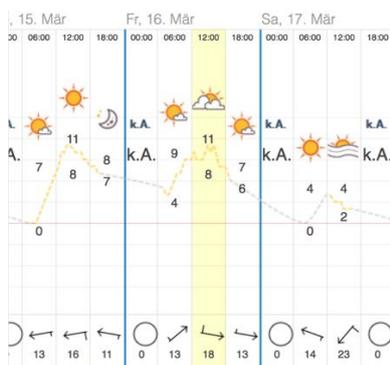


Abbildung 27: Wetterbedingung beim Testflug (timeanddate.de)

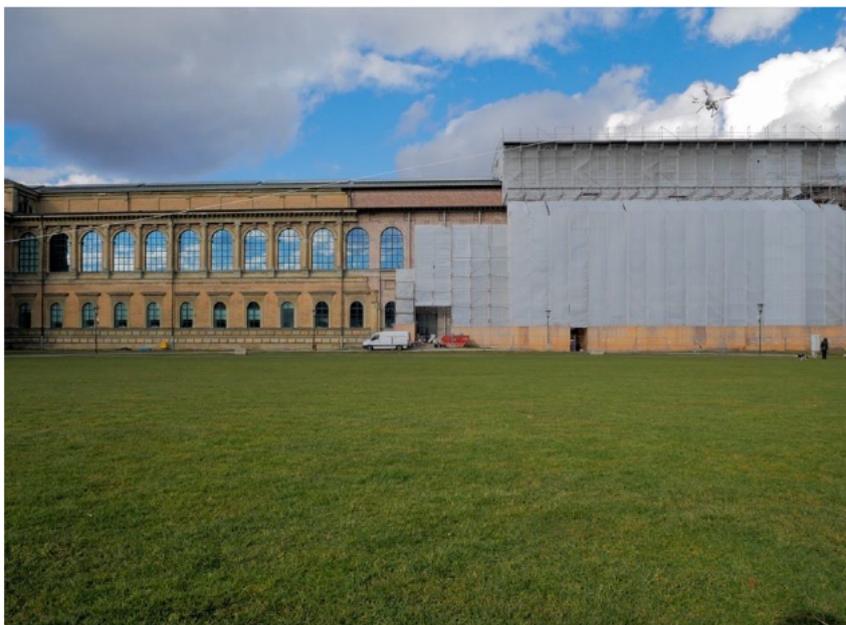


Abbildung 28: Testflug mit Phantom 4

Testflug:

Beim Testflug wurden folgende Punkte untersucht:

- das Verhalten des Seils
- das Verhalten des UASs
- das Erreichen vorgegebener Höhen und der Durchhänge

Fall	$f = 1,06 \text{ m}$	$f = 1,99 \text{ m}$
AUSGLEICHSGEWICHT	140 g	NN
VERHALTEN DES SEILS	unstabil, wenig Schwingungen	unstabil, viele Schwingungen
VERHALTEN DES KOPTERS	unstabil, wenig Pendelverhalten	unstabil, Pendelverhalten
HÖHENHALTUNG	Tendenz nach unten	Tendenz nach oben
DURCHHANGMESSUNG	2 Meter mit kleiner Schwankung	1 Meter mit großer Schwankung

Tabelle 5: Beobachtung beim Testflug

Auswertung:

Während dem Testflug wurden festgestellt, dass zum rechnerisch notwendigen Schub ein zusätzlicher Schubanteil benötigt wird. Dieser stellt die Manövrierfähigkeit während des Fluges unter Last und Umwelteinflüssen sicher. Die aktuell auf dem freien Markt vorhandenen Kopters besitzen in der Regel ein „thrust-to-weight-ratio“ (Schub-Gewicht-Verhältnis) von 2:1 für schnelles Aufsteigen (Alex, 2015).

Des Weiteren wurde der Einfluss des Ausgleichsgewichtes untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass durch die Verwendung eines Ausgleichsgewichtes neben dem Flugverhalten des Kopters die Steuerung und Messgenauigkeit verbessert wird. Die Steuerung verlangt bei hohen Windgeschwindigkeiten eine komplexe Justierung und schnelle Reaktionen, welche viel Flugerfahrung der Piloten erfordert. Deshalb ist ein Nachweis der Eignung der Piloten gemäß neuer Drohnen-Verordnung verpflichtend (BMVI, 2016).

4 Fallbeispiele

Da die Verwendung von Multikoptern zur Montage von Führungseilen noch keinen Stand der Technik bildet, gestaltete sich die Recherche nach Fallbeispielen dementsprechend aufwändig. Der erste Einsatz eines UAS in Europa erfolgte beim Bau der Highline 179 Brücke in Tirol (Galileo, 2015). Nach intensiven Recherchen konnte ein weiteres Bauvorhaben unter Anwendung eines UAS gefunden werden. Bei diesem Bauvorhaben handelt es sich um die Longjiang-Brücke in China. Jedoch besteht aktuell ein großes Defizit an detaillierten, wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Einsatz von UASs im Baugewerbe, bzw. im Brückenbau. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den oben genannten Fallbeispielen. Darüber hinaus soll mit dem in Kapitel 3 vorgestellten Programm zu jedem Fallbeispiel eine Vergleichsrechnung erfolgen. Außerdem wird als letztes Beispiel die Akashi-Kaikyo-Brücke in Japan, welche die längste Hängebrücke der Welt ist, vorgestellt. Abweichend zur UAS-Methode wurde hier die Helikopter-Methode verwendet. Es wird trotzdem auf dieses Fallbeispiel eingegangen, da anhand dieser Brücke ein theoretischer Versuch, mittels des Programmes aus Kapitel 3, unternommen wird, die Eignung der UAS-Methode auch für dieses Projekt zu bestätigen.

4.1 Longjiang-Brücke



Abbildung 29: Longjiang-Brücke in China (Sakowski, 2016)

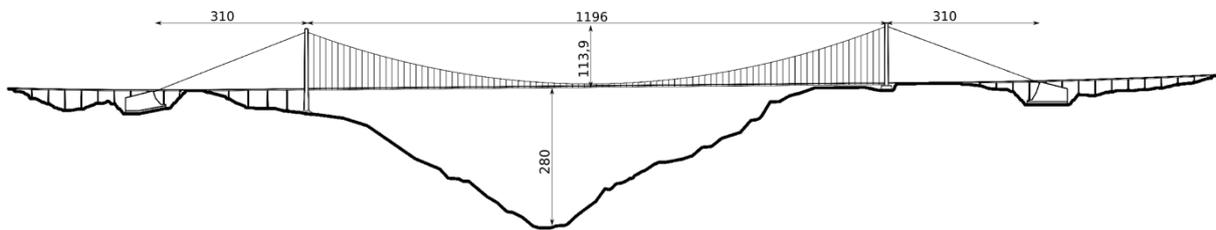


Abbildung 30: Longjiang-Brücke mit dem Geländeprofil (Sakowski, 2016)

Der erste Einsatz eines UAS als Träger des Führungsseils erfolgte 2014 beim Bau der Longjiang-Brücke in China. Zwischen den 1196 Meter entfernten Pylonen liegt ein 280 Meter tiefes Tal, welches den Longjiang-Fluss führt (Junxin et al., 2014). Das steile Gelände mit seinen dichten Vegetationen verhindert den Seilzug am Boden. Da die Einheimischen bereits Erfahrungen mit Drohnen bei Inspektionen des Stromnetzes gesammelt hatten (Deng et al., 2014), wurde beschlossen ein Multikopter ebenfalls beim Bau der Longjiang-Brücke einzusetzen (Shuo, 2015).

Die ausführende Baufirma, welche für die Montage des Führungsseils verantwortlich war, veröffentlichte keinerlei Dokumentationen über den Ablauf und das verwendete UAS. Auch auf direkte Nachfragen wurde nicht eingegangen. Jedoch können ausführliche und detaillierte Informationen zum Bau der Brücke und dem UAS im Internet eingesehen werden (Shuo, 2015)

4.1.1 Gewähltes UAS

Für dieses Bauvorhaben wurde eigens ein Hexakopter mit dem Namen FXQ-2 entwickelt. Er besitzt 6 Bürstenlose Motoren mit jeweils 580 Watt bei maximaler Leistung. Dadurch beträgt sein zulässiges Maximalgewicht 8 kg. Der Hexakopter besitzt ein

Leergewicht mit Batterien von lediglich 2,5 kg. Die Batterien (6S Lipo-Batterien) besitzen ein Gesamtgewicht 0,80 kg. Mit diesen Batterien kann im Leergewichtszustand eine Flugdauer von bis zu 28 Minuten erzielt werden. Unter Vollast werden nur noch 12 Minuten erreicht. Darüber hinaus besitzt der Hexakopter eine Kamera um eine optimale Bedienbarkeit während des Flugs zu gewährleisten. Die Fluggenauigkeit wird mittels eingebautem GPS-Empfänger auf eine Abweichung von 2 Meter begrenzt (Shuo, 2015).



Modell: FXQ-2

Bauform: Hexakopter

Eigengewicht: 2 kg

max. Leistung: 580W

max. Traglast: 8 kg

max. Flugdauer: 28 Min/ 12Min.

Abbildung 31: FXQ-2 bei der Longjiang-Brücke (Shuo, 2015)

4.1.2 Montagekonzept des Führungsseils

Vor der Montagearbeit muss zuerst die Wetterbedingung vor Ort analysiert werden. Wenn die Randbedingungen für den Einsatz des UAS eingehalten sind, werden eine Reihe an Testflügen mit und ohne Last auf einem Testgelände durchgeführt. Die Testflüge sind notwendig um einerseits sicherzustellen, dass der Anschluss zwischen dem Seil und dem UAS während der Montage tragfähig bleibt. Zum anderen soll überprüft werden ob ein normales Flugverhalten des UASs bei der vorherrschenden Witterung gewährleistet werden kann. Das verwendete Führungsseil besteht aus Polyester und besitzt eine Dicke von 2 mm.

Die Montage des Führungsseils wurde wie folgt ausgeführt:

1. Schutzgerüste für die im Tal liegende Straßen einbauen,
2 Sicherheitskräfte regulieren das Verkehrsaufkommen.
2. Das UAS, das Führungsseil mit der Spule und die Seilwinde in die Positionen auf dem Pylon stellen bzw. befestigen.
Ein Ausgleichsgewicht hängt im Abstand von 8 Meter vom UAS an dem Führungsseil.
3. Der Pilot fliegt zunächst das UAS vom östlichen zum westlichen Pylon. Dabei fliegt das UAS mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit. Während dem Flug

muss stets die Wetterbedingung, u.a. Windgeschwindigkeit und -richtung, kontrolliert werden. Um während dem Flug den vorher festgelegten Sicherheitsraum einzuhalten, erfährt das Führungsseil beim Transport eine zunehmende Vorspannung. Dadurch kann der Durchhang beeinflusst bzw. kontrolliert werden.

4. Sobald das UAS mit dem Führungsseil am westlichen Pylon angekommen ist, wird dieses vom UAS gelöst und am Pylon befestigt. Anschließend wird das UAS ohne Last auf dem Boden gelandet.
5. Nachdem die Montage des Führungsseils erfolgte, wurden Seile mit zunehmenden Durchmesser und Bruchlast über Seilwinden eingebaut. Dabei ist das Prinzip ein dünneres Seil im darauffolgenden Schritt durch ein stärkeres zu ersetzen. Dies wird so oft wiederholt, bis das endgültige Tragseil aus Stahl montiert wird. An dem Tragseil wird schließlich der Laufsteg montiert.

Folgende Tabelle zeigt die beim Bau der Longjiang-Brücke zum Einsatz gekommenen Seile. So wurde das Tragseil in fünf Schritten montiert.

Nr.	Material	Dicke (mm)	Eigengewicht (g/m)	Bruchlast (kN)
1	Polyester	2	4,5	0,8
2	Polyester	4	16	14
3	Polyester	8	50	58
4	Dyneema	16	190	210
5	Stahl	22	1700	280

Tabelle 6: Mechanische Daten der Seile an der Longjiang-Brücke (Shuo, 2015)

Während der Montage des Führungsseils müssen folgende sicherheitsrelevante Punkte eingehalten werden:

1. Mitarbeiter auf den Pylonen müssen stets Sicherheitskleidung, wie z.B. Auffanggurte, tragen
2. Das Seil muss während dem Flug störungsfrei von der Spule abgerollt werden können
3. Vor jedem Flug muss eine technische Untersuchung des UASs erfolgen
4. Vor dem Einsatz des Führungsseils muss die angegebene Bruchlast durch versuche bestätigt werden

5. Alle Seile bis auf das Tragseil sollen innerhalb eines Arbeitstages eingebaut bzw. ersetzt worden sein. Dies hat den Hintergrund, dass die verwendeten Führungs- bzw. Zwischenseile empfindlich auf Feuchteintragungen reagieren. So kann schon über Nacht der Feuchteintrag ausreichen um durch die Eigengewichtszunahme die Bruchlast des Führungsseils zu überschreiten
6. Um stets die Kontrolle über das UAS zu besitzen, müssen Funkstörungen vermieden werden

4.1.3 Mathematische Untersuchung

Die Longjiang-Brücke besitzt folgende charakteristische Daten:

- Hauptspannweite: 1196 m
- Nebenspannweite: 310 m
- Pylonhöhe: 113,9 m
- max. Fahrbahnhöhe über Grund: 280 m

Technische Daten des Führungsseils:

- Material: Polyester
- Seildurchmesser: 2 mm
- Eigengewicht: 4,5 g/m
- Bruchlast: 0,8 kN

Folgende Annahmen werden beim Berechnen getroffen:

- E-Modul des Polyesterseils: 15000 N/mm²
- Sicherheitsabstand über Grund: 20 m (wegen Vegetation)
- Flugneigung des UASs: 30°

Der tiefste Punkt des Tals liegt nicht in der Mitte des Hauptspans. Dadurch ist der Freiraum für den Seildurchhang begrenzt. Mit Hilfe der Software „Inkscape“ wurde der maximal mögliche Durchhang des Führungsseils bestimmt. Dieser hängt in diesem Fall von dem Geländeprofil ab. Der maximale Durchhang beträgt somit ca. 250 m.

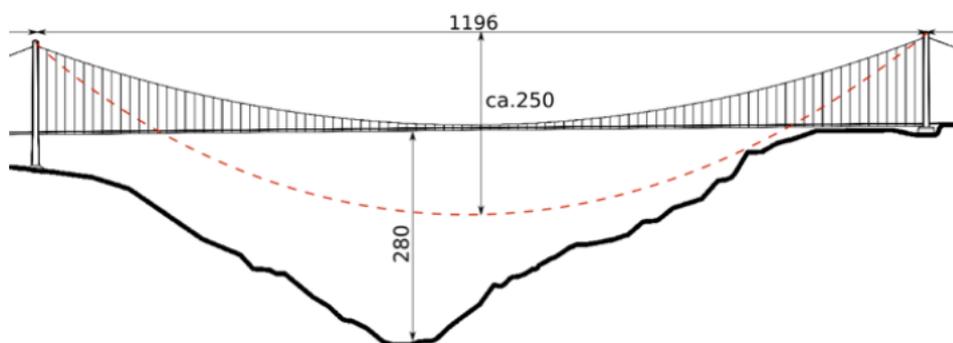


Abbildung 32: Geländeprofil Longjiang-Brücke mit max. Seildurchhang

Hauptspann — Horizontale Sehne:

Bei dem Hauptspann zwischen den Pylonen erfolgt ein horizontaler Transport des Führungsseils. Dadurch beträgt der maximal mögliche Durchhang, mit einem angenommenen Sicherheitsabstand von 20 m, $f = 250 - 20 = 230$ m.

Mit dem Berechnungsprogramm aus Kapitel 3 können Seilkräfte, Durchhänge, sowie verschiedene Seilauflängungen berechnet werden. Die Ergebnisse können in nachfolgender Tabelle eingesehen werden:

Nr.	S_0 (m)	H (kN)	RB (kN)	S (kN)	f (m)	φ (°)	AGG (kg)	ges.A (N)
1	1207,96	0,093	0,027	0,097	87,09	16,3	10,90	186,08
2	1219,92	0,072	0,027	0,077	112,74	20,8	7,26	144,40
3	1231,88	0,061	0,028	0,067	134,60	24,5	5,25	121,52
4	1243,84	0,053	0,028	0,060	153,95	27,7	3,95	106,76
5	1255,80	0,048	0,028	0,056	171,51	30,4	3,01	96,30
6	1267,76	0,044	0,029	0,053	187,75	32,8	2,30	88,39
7	1279,72	0,041	0,029	0,050	202,96	35,0	1,74	82,16
8	1291,68	0,039	0,029	0,048	217,36	37,0	1,27	77,09
9	1303,64	0,036	0,029	0,047	231,09	38,8	0,88	72,86
10	1315,60	0,035	0,030	0,046	244,26	40,5	0,54	69,26
11	1327,56	0,033	0,030	0,045	256,97	42,1	0,24	66,15

Tabelle 7: Seilkräfte und Anforderungen—Hauptspann der Longjiang-Brücke

Bei einem maximalen Durchhang von 230 m können nur die ersten acht Ergebnisse betrachtet werden. Dabei ist der Fall Nr. 8 der einzige, welcher die Randbedingungen für die Verwendung der FXQ-2 erfüllt. Die Fälle eins bis sieben überschreiten den erzeugbaren Schub, von 8 kg (80 N), des Multikopters.

Mit einem Durchhang von 217,36 Meter sollte der Fall acht für die Longjiang-Brücke gewählt werden. Dabei wird ein Ausgleichsgewicht mit einem Gewicht von 1,27 kg benötigt. Die Verwendung des Ausgleichsgewichtes kann in Abbildung 33 eingesehen werden.

Die Führungsseile zwischen Anker und Pylon der Longjiang-Brücke befinden sich zum Großteil nah am Boden. Dadurch konnte auf einen Einsatz des UAS verzichtet werden.



Abbildung 33: Flugaufnahmen der FXQ-2 (eppurca, pamihe, 2014)

4.2 Highline 179



Abbildung 34: Highline179 (highline179.tirol)

In Europa kam die Verwendung eines UAS zur Montage des Führungsseils erstmals 2014 zum Einsatz. Dies wurde beim Bau der längsten Fußgängerhängebrücke der Welt (Stand 2014), der „Highline 179“ (Reutte in Tirol), realisiert. Diese Brücke besitzt eine Länge von 406 m und spannt auf einer Höhe von 114 m über ein Tal. Sie überführt die Fernpassstraße B179 zwischen dem Fort Claudia und der Ruine Ehrenberg. (highline179, 2015)

Nachfolgende Abbildung zeigt das Geländeprofil der Highline 179 Brücke in der Draufsicht.

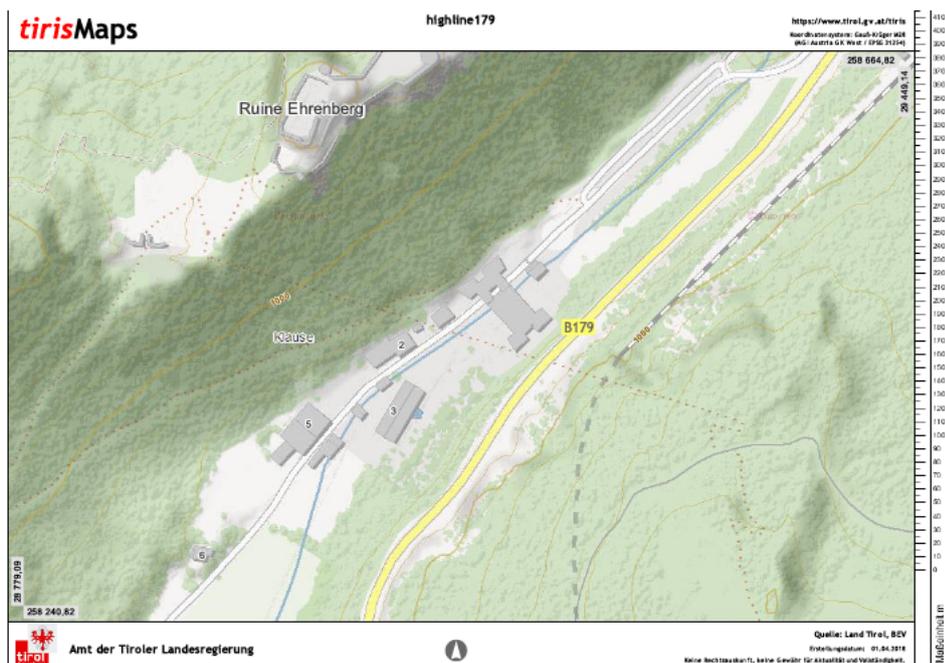


Abbildung 35: Geokarte der Highline 179 (Amt der Tiroler Landesregierung, 2018)

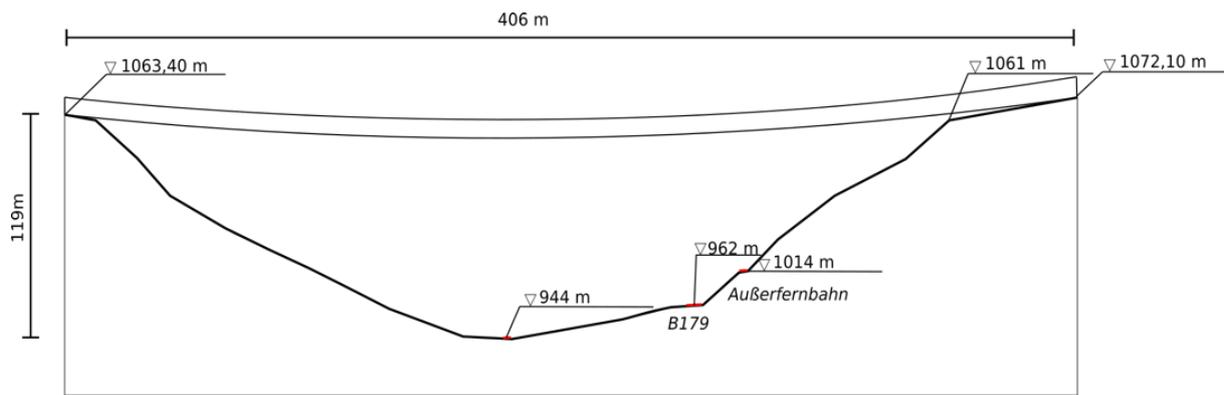


Abbildung 36: Geländeprofil der Highline 179

Die Motivation zum Bau der Highline 179 war es einen schnellen und sicheren Zugang für die Besucher der Burgenwelt Ehrenberg zu gewährleisten. Dabei sollte der Bau der Brücke mit dem geringsten Eingriff in die Natur ausgeführt werden. Besonders anspruchsvoll war der Bau über die vielbefahrene Fernpassstraße B179 und die Außerfernbahn im Tal. Da diese Straßen für die Bauphase nicht gesperrt werden konnten, konnte kein Seilzug über Grund erfolgen. Dadurch wurde ein Multikopter für die Montage des Führungsseils gewählt (highline19.tirol, 2015).

4.2.1 Interview mit der Firma SWISSROPE

Die Montage des Führungsseils, der Highline 179, mit Hilfe eines Multikopters, erfolgte durch die Firma SWISSROPE. Dem Verfasser ist es gelungen ein Interview mit den Geschäftsführern, welche ebenfalls die Montage beim Bau der Highline 179 geleitet haben, zu führen. Nachfolgend wird das Interview mit Herrn Theo Lauber und Herrn Kevin Lauber wiedergegeben:

Q (Verfasser): *Welches Modell wurde beim Führungsseilzug verwendet? Wurde es vorher getestet?*

A (Herr Lauber): Phantom 2. Wir hatten 2 Testflüge über 450 m in der Schweiz gemacht vorher.

Q (Verfasser): *Wie dick war das erste Silk?*

A (Herr Lauber): Das war kein Silk, sondern ein biologisch abbaubarer Faden aus Baumwolle (vom Gefühl her), mit einer Bruchkraft von weniger als 1 kg. Das bietet für

den Fall eines verlorenen Fadens Gewähr, dass sich Tiere nicht im Faden fangen, sondern ihn zerreißen können.

Q (Verfasser): *Wieso hat man nicht einen dickeren Faden mit einer höheren Bruchkraft als Führungsseil genommen?*

A (Herr Lauber): Wir waren uns damals selber nicht sicher, ob dieser Flug klappen wird, sollte der Faden irgendwo im Wald liegenbleiben, ist so sichergestellt, dass sich aufgrund der geringen Bruchkraft ein Tier nicht daran verletzen kann.

Q (Verfasser): *Welche Dicke hat der Baumwolle-Faden?*

A (Herr Lauber): 0,2 mm.

Q (Verfasser): *Wie groß war der maximale Durchhang beim Flug?*

A (Herr Lauber): 2 m. Der Faden ist so leicht, dass er in der Luft schwimmt.

Q (Verfasser): *Wie war die Wetterbedingung beim Flug?*

A (Herr Lauber): Wir haben um 8:00 den ersten Flug gemacht, als der Nebel weg war. Tiptop gelaufen, aber das Galileoteam war noch nicht da. Darum legten wir diesen Faden in eine Seite und flogen um 10:00 wie vereinbart einen Faden durch neblige Luft. Ging perfekt, aber beim Aufrollen des Fadens riss er an der scharfen Kante des Haspels, darum Versuch 3 mit blinkender Akkuwarnung der Drohne... Am Ende „stieg“ die Drohne nicht wie gewollt, drum bin ich mit Schwung ins Gelände unsanft gelandet. Ich wollte nicht riskieren, dass der Faden mit dem unterdessen aufkommen- den Seitenwind die stehende Drohne zurückzieht.

Q (Verfasser): *Im Video von highline 179 war noch eine Schraubenmutter an der Drohne gehängt. Diente diese als ein Ausgleichsgewicht oder nur dafür, dass der Faden nicht in die Propeller kommt?*

A (Herr Lauber): Die Schraubenmutter war nur dafür da um zu verhindern, dass der Faden in die Propeller kommt, dieses Prinzip wird auch bei Helikopterseilzügen angewendet.

Q (Verfasser): *Gab es Sicherheitsmaßnahmen für die Fernpassstraße B179 und im Tal liegende Gebäude?*

A (Herr Lauber): Dieser schwache Faden wäre unbedenklich für den Scheibenwischer.

Q (Verfasser): *Wie lang hat die Arbeit des Seilzuges gedauert?*

A (Herr Lauber): Das Fliegen der 3 Fäden etwa 4 Std. (mussten immer wegen dem Nebel warten). Nachher am Faden den 0,05 Silk, 0,2 mm Silk, 4 mm Seil, 8 mm Seil, 16 mm Seil, 10 mm Stahlseil weitere 3 Std. - mit Seilwinden.

Q (Verfasser): *Welche Behörden wurden darüber informiert?*

A (Herr Lauber): Alle. 3 davon sind sogar vor Ort gekommen vorrangig und haben gemeint, ich fliege dann schon mal (was ich natürlich LEIDER nicht konnte, weil sie ja erst die Zusage schriftlich machen mussten).

Interview wurde geführt mit:

Herrn Theo Lauber, Herrn Kevin Lauber

Geschäftsführer der Lauber.AG,

Winklenstrasse 61, CH- 3714 Frutigen

30. März 2018



Abbildung 37: Aufnahme des Videos von Highline 179 (highline179.tirol)

4.2.2 Mathematische Untersuchung

Die Besonderheit der highline 179 ist, dass die Brücke keinen Nebenspann besitzt. Der Seilzug mithilfe des UASs erfolgte horizontal. Da kein Hersteller für den Baumwollfaden mit einer Stärke von 0,2 mm zu finden war, wird bei der Berechnung eine Angelschnur aus Polyamid mit ähnlichen charakteristischen Werten angenommen.

Bei der Highline 179 wurde die Phantom 2 Vision Drohne von DJI verwendet. Diese besitzt folgende technische Eckdaten (DJI, 2014):

- Bauform: Quadrocopter
- Eigengewicht: 1160 g
- Diagonale Größe: 350 mm
- max. Flugneigung: 35 °
- max. Geschwindigkeit: 15 m/s
- Funkreichweite: 300 m



Abbildung 38: Phantom 2 Vision von DJI (DJI, 2014)

Die Angelschnur (Seakight) aus Polyamid (Nylon) besitzt folgende Eigenschaften:

- Durchmesser: 2 mm
- Bruchlast: 3,17 kg
- Eigengewicht: 0,145 g/m
- E-Modul Nylon: 3500 N/mm²



Abbildung 39: Angelschnur von Seaknight (seaknightfishing)

Eine Darstellung von dem Führungsseil im Geländeprofil kann folgender Abbildung entnommen werden.

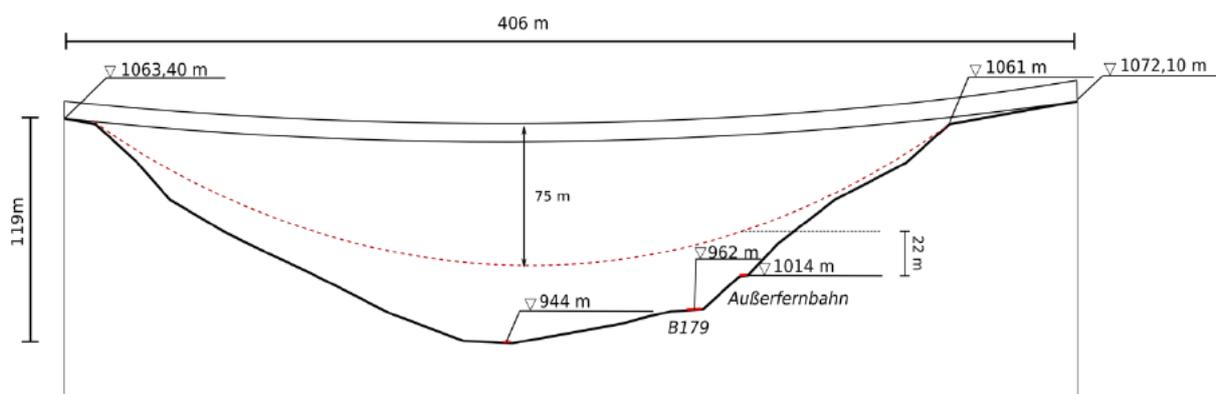


Abbildung 40: Darstellung des Führungsseils bei Highline 179

Aus dem Geländeprofil folgt ein maximaler Durchhang in Feldmitte von 75 m. Aufgrund der vorherrschenden Vegetation wird ein zusätzlicher Sicherheitsabstand von 20 m zur GOK angenommen. So darf der Durchhang maximal $f = 75 - 20 = 55$ m betragen.

Das Seil wurde auf der einen Seite an der Rampe auf einer Höhe von 1061 mNN befestigt (Abbildung 40). Dies kann auch in der Berichterstattung über den Bau der Brücke eingesehen werden (Galileo, 2015).

Mit dem Berechnungsprogramm ergeben sich folgende Ergebnisse:

Nr.	s_0 (m)	H (kN)	RB (kN)	S (kN)	f (m)	φ°	AGG (kg)	ges.A (N)
1	406,004	1,43E-03	2,94E-04	1,46E-03	20,97	11,6	NN	11,7
2	406,008	1,43E-03	2,94E-04	1,46E-03	20,98	11,6	NN	11,7
3	406,012	1,43E-03	2,94E-04	1,46E-03	20,99	11,6	NN	11,7
4	406,016	1,43E-03	2,94E-04	1,46E-03	21,00	11,6	NN	11,7
5	406,020	1,43E-03	2,94E-04	1,46E-03	21,01	11,7	NN	11,7
6	406,024	1,43E-03	2,94E-04	1,46E-03	21,02	11,7	NN	11,7
7	406,028	1,43E-03	2,94E-04	1,46E-03	21,03	11,7	NN	11,7
8	406,032	1,42E-03	2,94E-04	1,45E-03	21,04	11,7	NN	11,7
9	406,037	1,42E-03	2,94E-04	1,45E-03	21,05	11,7	NN	11,7
10	406,041	1,42E-03	2,94E-04	1,45E-03	21,06	11,7	NN	11,7

Tabelle 8: Seilkräfte und Anforderungen—Hauptspann der Highline 179

AGG: Ausgleichsgewicht; NN: nicht notwendig

Wie zu sehen ist, unterscheiden sich die Ergebnisse für verschiedene Seilauflängen s_0 kaum voneinander. Der Grund dafür ist das sehr geringe Eigengewicht. Sogar für kleine Durchhänge resultiert eine geringe Lastbeanspruchung des Quadropters. Ein Ausgleichsgewicht ist dabei auch nicht notwendig. Für das Ersatzseil kann ein Durchhang von rund 21 m für Berechnungen angesetzt werden. Dieser Wert weicht

von der Aussage von Herrn Lauber im Interview ab, da der Windeinfluss bei der Berechnung vernachlässigt wurde. Zudem besitzt das Polyamid Seil vermutlich ein anderes Eigengewicht als das Baumwollseil.

4.3 Akashi-Kaikyo-Brücke als Rechenbeispiel



Abbildung 41: Akashi-Kaikyo-Brücke (Kim Rötzel, 2005)

Bei der längsten Hängeseilbrücke der Welt (Stand 2018), der Akashi-Kaikyo-Brücke in Japan, wurde auch der Luftweg für die Montage des Führungsseils verwendet. Dabei wurde ein Helikopter eingesetzt. Die freihängende und schwimmende Methode wurden von Beginn an, aufgrund des hohen Schiffverkehrsaufkommen, ausgeschlossen. Der Einsatz eines Helikopters wurde zuerst als zu riskant angesehen. Um die Risiken zu minimieren, wurden vor der Bauphase verschiedene Testreihen durchgeführt (Takeno et al., 1997).

Da die UAS-Methode der Helikopter-Methode ähnelt, sind diese Experimente auch beispielhaft für zukünftige Projekte mit der UAS-Methode von Relevanz.

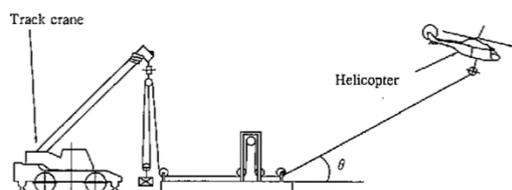


Abbildung 42: Experiment zur Kraftverteilung (Takeno et al., 1997)

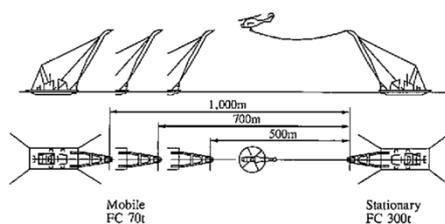


Abbildung 43: Experiment zur Untersuchung des Durchhangs (Takeno et al., 1997)

4.3.1 Mathematische Untersuchung der UAS-Alternative

Es soll eine Vergleichsrechnung für die Verwendung eines UAS am Beispiel der Akashi-Kaikyo Brücke erfolgen. Dabei wird das in Kapitel 3 vorgestellte Programm verwendet. Das Ziel ist es herauszufinden ob ein UAS bei diesem Bauvorhaben ebenfalls eine sinnvolle Methode darstellen würde.

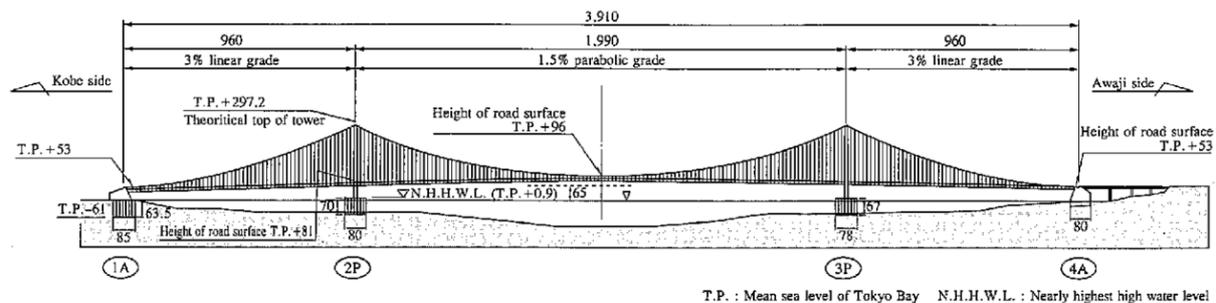


Abbildung 44: Bauplan der Akashi-Kaikyo-Brücke (Takeno et al., 1997)

Die Akashi-Kaikyo-Brücke besitzt eine Hauptspannweite zwischen den Pylonen von 1190 m und 2 Nebenspannweiten, zwischen Pylon und Anker, von jeweils 960 m. Die Spitzen der Pylonen befinden sich auf einer Höhe von 297,20 mNN.

Im Folgenden wird die Seilkraft beispielhaft für ein Seil mit horizontaler und schräger Sehne berechnet. Dabei sind folgende Anforderungen und Annahmen zu berücksichtigen:

- 1 kg = 10 N
- Die maximale Seilkraft darf die Bruchlast des Seils nicht überschreiten
- Der maximale Durchhang des Seils muss stets über der Meeresoberfläche bleiben
- Windlast und Niederschlaglasten werden vernachlässigt
- Temperaturschwankung sind nicht vorhanden
- Führungsseils: 1mm Dyneema Seil PRO von Kanirope®
- Seilaustragslänge s_0 :
 - Hauptspann: 2020 m
 - Nebenspann: 1020 m
 - Faktor $s_0/l = 1,015$
- Das UAS besitzt ein Gewicht von 2,5 kg (vergleichbar mit FXQ-2)
- Das UAS kann mit max. 8 kg Traglast aufsteigen (vergleichbar mit FXQ-2)
- Flugneigung: 30°

Als Führungsseil wird das Dyneema Seil PRO von Kanirope® gewählt, da es äußerst Dehnungsarm und reißfest ist. Außerdem ist das Material Dyneema leicht und schwimmfähig.

Das Seil besitzt folgende charakteristische Werte:

- Durchmesser: 1 mm
- Eigengewicht 0,9 g/m
- Bruchlast: 195 kg
- Materialbezeichnung: Dyneema® SK78
- Arbeitsdehnung: < 1%
- E-Modul: 12000 N/mm²

Horizontale Seilsehne für den Hauptspann

Das Eigengewicht q des Seils:

$$q = 0,09 \frac{kg}{100m} = 9 \cdot 10^{-6} \frac{kN}{m}$$

Aus (2.14) erhält man die Gleichung:

$$\frac{2H}{9 \cdot 10^{-6}} \sinh \frac{1990 \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{2H} = 2050 +$$

$$+ \frac{H^2}{9,425 \cdot 9 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{1990 \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{2H} + \frac{1}{4} \sinh \frac{1990 \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{H} \right)$$

mit

$$EA = 9,425 \text{ kN}$$

Durch Auflösen der Gleichung nach H resultiert:

$$H = 0,027 \text{ kN} ,$$

Der Durchhang f berechnet sich zu:

$$f = k \left(\cosh \frac{l}{2k} - 1 \right) = 166,52 \text{ m} ,$$

mit

$$k = \frac{H}{g} = \frac{0,027 \text{ kN}}{9 \cdot 10^{-6} \text{ kN/m}} = 3000 .$$

Die vertikalen Auflagerkräfte R_A und R_B ergeben sich zu:

$$R_A = R_B = \frac{s_0 \cdot g}{2} = \frac{2020 \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,0091 \text{ kN}.$$

Die maximale Seilkraft S :

$$\max S = \sqrt{R_B^2 + H^2} = 0,0285 \text{ kN}.$$

Der Winkel φ beträgt:

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{0,0091}{0,0285} = 18,6^\circ.$$

Bei der Wahl des UASs muss auf die Kraftverteilung aus dem Kapitel 2.4 zurückgegriffen werden, um den erforderlichen Gesamtschub zu berechnen.

s_0 (m)	H (kN)	R_B (kN)	S (kN)	f (m)	φ °	AGG (kg)	Ges.A (N)
2020	0,027	0,009	0,029	166,52	18,6	1,3	54

Tabelle 9: Kraftverteilung und erforderlicher Schub beim Fall Akashi-Kaikyo-Brücke, horizontale Sehne

Mit einem Durchhang von $f = 166,52$ m beträgt der Abstand zwischen dem Seil und der Meeresoberfläche: $297,2 - 166,52 = 130,68$ m.

Schräge Seilsehne

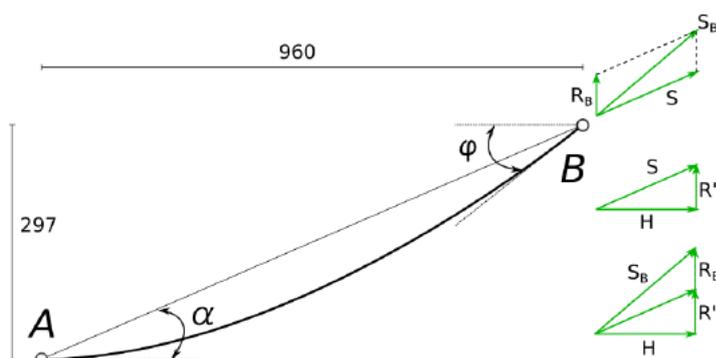


Abbildung 45: Darstellung der schrägen Sehne der Akashi-Kaikyo-Brücke

Die Verbindung vom Anker zum Pylon wird als eine schräge Sehne mit einer Spannweite von 960 Meter berechnet.

Wie bereits in Kapitel 2 ausgeführt, verursacht die Berechnung der exakten Lösung der Seilgleichung in der Praxis Probleme. Dadurch wird auf eine Näherungslösung zurückgegriffen.

$$S^3 + S^2 EA \left[1 - \frac{1}{s_0} (l_s - \alpha_t \Delta t s_0) \right] = \frac{EA \cos \varphi q^2 l^3}{24 s_0}.$$

Nach dem Einsetzen folgt:

$$\begin{aligned} S^3 + S^2 \cdot 9,425 \left[1 - \frac{1}{1020} (1004,89) \right] &= \\ &= \frac{9,425 \cdot 0,96 \cdot (9,4 \cdot 10^6)^2 \cdot 960^3}{24 \cdot 1020}, \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned} l_s &= \sqrt{960^2 + 297^2} = 1004,89 \text{ m}; \\ \varphi &= \sin^{-1} \frac{297}{1004,89} = 17,2^\circ. \end{aligned}$$

Nach Umformen folgt S zu:

$$S = 0,0137 \text{ kN}.$$

Die Kräfte am Knoten ergeben sich zu:

$$R' = S \cdot \sin \varphi = 0,0083 \text{ kN},$$

$$H = S \cdot \cos \varphi = 0,0267 \text{ kN},$$

$$R_B = \frac{q \cdot l}{2} = 0,0045 \text{ kN}.$$

Die maximale Zugkraft am Knoten beträgt:

$$S_B = \sqrt{H^2 + (R_B + R')^2} = 0,0296 \text{ kN}.$$

Zusammen mit der Kraftverteilung ergibt sich:

S0 (m)	H (kN)	RB (kN)	S (kN)	f (m)	φ °	AGG (kg)	ges.A (N)
1020	0,027	0,005	0,030	82,77	33,2	NN	32,8

Tabelle 10: Kraftverteilung und erforderlicher Schub beim Fall Akashi-Kaikyo-Brücke, schräge Sehne

Auswertung der Ergebnisse:

Die maximale Seilkraft stellt sich beim Fall der schrägen Sehne ein.

Die horizontale Sehe liefert jedoch den maßgebenden erforderlichen Schub.

Gemäß den zuvor ermittelten Ergebnissen darf die Zugfestigkeit des Seils den Wert 0,03 kN nicht unterschreiten. In Feldmitte der horizontalen Sehne stellt sich ein von f

= 166,52 m ein. Der Seildurchhang erfährt besonders in praktischen Anwendungen eine maßgebende Rolle, da gewisse Sicherheits- bzw. Verkehrsräume unter dem Seil freizuhalten sind.

Bei einem maximalen Durchhang des Seils von 166,52 m bleibt noch ein freier Verkehrsraum mit einer Höhe von 130,68 m übrig. Dies ist ausreichend um den Schiffsverkehr nicht zu beeinträchtigen.

Die Kraftverteilung ergibt einen maßgebenden Gesamtschub von 54 N bei einer Flugneigung von 30° , welcher vom UAS aufgebracht werden muss. Dabei ist ein Ausgleichsgewicht von 1,3 kg beim Flug zwischen den Pylonen (horizontale Sehne) notwendig. Beim Flug vom Anker zum Pylon (schräge Sehne) ist ein Ausgleichsgewicht nicht notwendig, da das UAS bei einer Flugneigung von 30° ausreichend Vor- und Auftrieb liefert.

Bei der Verwendung des Hexakopter FXQ-2, welcher bei der Longjiang-Brücke zum Einsatz kam, ist ein aufzubringender Schub von 54 N problemlos möglich.

5 Auswertung und Fazit der Fallbeispiele

Anhand der in Kapitel 4 vorgestellten Fallbeispiele sollte aufgezeigt werden, dass die UAS-Methode bereits praxistauglich ist. Anhand des theoretischen Versuches in Kapitel 4 sollte aufgezeigt werden, dass es in der Theorie möglich ist die Helikopter-Methode durch die UAS-Methode zu ersetzen. Dies würde vor allem einen großen wirtschaftlichen Vorteil bieten.

Nachfolgend werden die Longjiang-Brücke und die Highline 179 bezüglich ihrer Ausführung bewertet.

5.1 Longjiang-Brücke

Die Longjiang-Brücke gilt als Pilotprojekt für die Anwendung des UASs. Dabei wurde besonders sensibel auf Maßnahmen zum Schutz der Personen und des Verkehrs während der Montage des Führungsseils geachtet. Die „Fail-Safe“ Eigenschaft des Hexakopters bietet darüber hinaus einen zusätzlichen Schutzmechanismus. Während der Verwendung des UAS wurden alle Störfaktoren, welche die Funkverbindung beeinträchtigen können, abgeschirmt. Dadurch konnte ein störungsfreies Funksignal über die gesamte Flugdauer gewährleistet werden. Die kurze Arbeitszeit ist einerseits wirtschaftlich, andererseits vermeidet diese den Feuchteintrag des Seils durch ein schnelles Austauschen der Seile. Im Vergleich zum Führungsseil, welches bei der Highline 179 verwendet wurde, besitzt hier das Führungsseil eine höhere Bruchlast. Dadurch können Zwischenschritte bis zum Einbau des Tragseils übersprungen werden.

Gemäß den Ergebnissen in Kapitel 4.1.3 muss das UAS einen Gesamtschub von 77,09 N erzeugen um das Seil im Endzustand des Seilzuges halten zu können. Dieser grenzt sehr nah an dem maximalen Schub von 80 N. Wie in Kapitel 3 erläutert, beeinflusst die Traglast direkt das Flugverhalten des UASs. Der resultierende Gesamtschub ergibt sich dabei aus dem hohen Eigengewicht des verwendeten Seils. Ein Seil aus einem leichteren Material wie beispielsweise UHMWPE (ultrahigh molecular weight polyethylene) von Dyneema wäre eine wirtschaftliche Alternative für den Seilzug mit einem Multikopter. Es bleibt die Frage ob der Hexakopter am Ende der Flugbahn stabil auf einer bestimmten Höhe in der Luft schweben konnte. Außerdem wurden keine An-

gaben zu Schutzmaßnahmen für Tiere gegeben, obwohl die Bruchlast des Führungsseils sehr hoch war und dies ein Verletzungsrisiko für Tiere bei einem Seilverlust zur Folge haben könnte.

5.2 Highline 179

Mit dem Bau der Highline 179 ist es gelungen eine Hängebrücke mit einem minimalen Eingriff in die Natur zu realisieren. Das dabei verwendete Führungsseil aus Naturfaser ist auf der einen Seite umweltfreundlich und auf der anderen Seite von Tieren leicht zu zerreißen (Seilverlust).

Während der Montage des Führungsseils wurde auf Schutzmaßnahmen der Fernpassstraße B179 und der Außerfernbahn verzichtet. Für den Fall des Seilverlustes stellt der Faden aufgrund seiner geringen Bruchlast kein Sicherheitsrisiko für den Verkehr dar. Das bei diesem Bauvorhaben verwendete UAS war ein Quadrocopter ohne „Fall-Safe“-Eigenschaft. Im Fall eines Motorausfalls konnte Verkehrssicherheit nicht zweifelsfrei eingehalten werden.

Laut Herstellerangaben des Quadrocopters (DJI) besitzt das verwendete Modell eine maximale Reichweite von 300 m. Die Spannweite der Brücke von 406 Meter ist jedoch deutlich höher als diese Angabe. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde der Quadrocopter vom Endpunkt via Videoübertragung gesteuert. Bei Reichweiten über 300 m können Signalverluste auftreten.

5.3 Rechtliche Grundlagen in Deutschland

Seit 2017 gilt die neue Drohnen-Verordnung in Deutschland (BMVI, 2017). Für die Anwendung des UAS bzw. Multikopters auf Baustellen sind viele wichtige Regeln zu beachten. Einige davon werden im Folgenden aufgezählt.

1. Kennnismnachweis der Piloten und ein Kennzeichenpflicht der UAS, um im Schadensfall schnell den Halter feststellen zu können.
2. Es gilt ein allgemeines Betriebsverbot für UAS in einer Flughöhe über 100 Meter, über sensiblen Bereichen oder in Kontrollzonen von Flugplätzen. Andernfalls ist eine Ausnahmeerlaubnis von den zuständigen Behörden erforderlich.
3. Unbemannte Luftfahrtsysteme und Flugmodelle sind verpflichtet bemannten Luftfahrzeugen und unbemannten Freiballone auszuweichen (BMVI, 2017).

5.4 Fazit

Die Anwendung des UASs als Träger des Führungsseils ist durchaus möglich. Die Berechnung bei der Akashi-Kaikyo-Brücke dient als theoretischer Beweis, dass ein Hexakopter (z.B. FXQ-2) auch für die Montage des Führungsseils der längsten Hängebrücke der Welt anwendbar ist. Dabei erzeugt ein elektrisch betriebener Multikopter keine Abgase und schont dadurch die Umwelt.

Da der Hexakopter FXQ-2 keine Herstellerangabe besitzt, ist es nicht möglich die Kosten des Hexakopters zu ermitteln. Ein vergleichbarer Hexakopter wäre z.B. Matrice 600 Pro von DJI. Dieser erzeugt eine identische maximale Nutzlast (DJI, 2017). Der Matrice 600 Pro liegt preislich bei 5700€. Dabei kann ein UAS vielfältig eingesetzt werden. Weitere Anwendungsgebiete des UAS wären z.B. die Inspektion von Bauwerken oder das 3D-Mapping (Tatum & Liu, 2017). Der Einsatz eines Helikopters hat einen hohen Mietpreis zur Folge. So bietet z.B. „Aviation Broker“ einen einmotorigen Hubschrauber ab 1000 € pro Stunde an. So ist die UAS-Methode langfristig die wirtschaftlichere Lösung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, eine alternative Methode zu den aktuellen Montagevarianten des Führungsseils zu erarbeiten. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf die Verwendung von UAS in Form von Multikoptern gelegt und deren Eignung zur Montage des Führungsseils untersucht.

Mit Hilfe der Seilstatik, welche im Zuge dieser Arbeit vorgestellt wurde, konnten die auftretenden Belastungen des UAS hergeleitet werden. Mit diesem Wissen wurde die theoretische Eignung von Multikoptern für die Montage des Führungsseils nachgewiesen. Anhand der vorgestellten Fallbeispiele erfolgte ebenfalls der praktische Nachweis für die Verwendung dieser Methode. Ein praktischer Großversuch für sehr große Spannweiten würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Der hier erbrachte theoretische Beweis soll jedoch als Grundlage und Anreiz für eine weiterführende groß angelegte Testreihe dienen.

Um die Eignung von Multikoptern besser einschätzen zu können, wurde auch auf deren Funktionsweise eingegangen. Dies ist notwendig um die sich einstellende Kraftverteilung am Kopter erklären zu können. So wurde gezeigt, dass die Kraftverteilung u.a. von den Winkeln φ am Festpunkt und β am Kopter abhängt. Zusammen mit den Ergebnissen aus Kapitel 3 wurden Anforderungen für das UAS unter idealen Bedingungen, als Orientierung, aufgestellt.

Um die theoretische Eignung eines UAS als Träger des Führungsseils zu prüfen, wurde ebenfalls eine Versuchsreihe durchgeführt. Dabei wurde die Theorie unter Beachtung der auftretenden Abweichungen bestätigt. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass Umwelteinflüsse, wie z.B. Windgeschwindigkeit und Niederschlag, einen erheblichen Einfluss auf das Testergebnis haben. Diese Einflüsse können in den Berechnungen bisher nur sehr schwer bzw. gar nicht berücksichtigt werden. An dieser Stelle besteht großes Potential Umwelteinflüsse für verschiedene Bauformen von Multikoptern zu untersuchen. Dies könnte jedoch das Thema einer separaten Arbeit werden.

Weiterführend besteht ein Optimierungsbedarf der technischen Ausführung des UAS. Beispielsweise könnte das UAS über eine Applikation gesteuert werden und eine vorher festgelegte Wegpunktroute abfliegen (Hackney & Clayton, 2015).

Ein weiterer Ansatz für die allgemeine Tauglichkeit von UAS im Baugewerbe wäre die Stromversorgung der UAS durch ein fest verbundenes Stromkabel. Im Bereich des Brückenbaus könnte auf diese Weise das Führungsseil gleichzeitig als Stromversorgung dienen. Dadurch wäre die Problematik der Laufzeitbegrenzung gelöst. Diese Lösung wird bereits von der Firma Aeronos realisiert, welche einen Kopter mit 28 Propellern für industrielle Zwecke produzieren (Aeronos, 2017).

Autonome UAS, die von selbst zusammenarbeiten können, wurden bereits 2012 entwickelt (Jiang & Kumar, 2013). Es wäre denkbar, mehrere Kopter zu verwenden um ein stärkeres Führungsseil zu transportieren. Dies würde die Nutzlast erhöhen und die Anzahl der Zwischenseile verringern.

Das UAS bietet zum aktuellen Zeitpunkt schon eine alternative Methode der Montage des Führungsseils. Die in dieser Arbeit aufgeführten Nachteile der UAS-Methode führen dazu, dass diese Methode nur sehr zaghafte Anwendung findet. Wenn die Nachteile durch Weiterentwicklungen beseitigt werden, kann diese Methode zur Standardmethode im Bauwesen werden.

Literaturverzeichnis

- .Aerones. (2017). Aerones. Retrieved April 18, 2018, from https://www.aerones.com/eng/drones/cleaning_drone/
- Agrawal, K., & Shrivastav, P. (2013). Multi-rotors: A Revolution In Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online Index Copernicus Value Impact Factor, 14611(11), 2319–7064*. Retrieved from www.ijsr.net
- Alex. (2015). How to choose the right motor for your multicopter drone - Guides - DroneTrest. Retrieved March 20, 2018, from <https://www.dronetrest.com/t/how-to-choose-the-right-motor-for-your-multicopter-drone/568>
- Amt der Tiroler Landesregierung. (2018). tiris - Tiroler Rauminformationssystem | Land Tirol. Retrieved April 20, 2018, from <https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/tiris/>
- Baichtal, J. (2015). *Drohnen Und Multicopter Bauen*. mitp Verlags GmbH & Co. KG, Frechen. Retrieved from <http://www.mitp.de/279>
- Bauformen von Drohnen und Multicoptern | Drohnen Multicopter Quadrocopter. (n.d.). Retrieved March 20, 2018, from <https://www.drohnen.de/bauformen-von-drohnen-und-multicoptern/>
- BMVI. Kurzinformation über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur § (2016). Retrieved from https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LF/unbemannte-lufffahrtsysteme.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI. Die Drohnen-Verordnung FAQ, BMVI § (2017). Retrieved from https://www.bmvi.de/blaetterkatalog/catalogs/327618/pdf/save/bk_1.pdf
- BMVI - Klare Regeln für Betrieb von Drohnen (2017). Retrieved from <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LR/151108-drohnen.html>
- Brown .D. J. (2005). *Brücken - kühne Konstruktionen über Flüsse, Täler, Meere*. Callwey Verlag. ISBN: 3-7667-1645-x
- Bühler D. (2000). *Brückenbau*. Deutsches Museum. ISBN: 3-924183-55-4

- Che, J. (2009). Leading Rope Linking Methods in Cable Construction of Long Span Suspension Bridge.
- Dandois, J., Olano, M., & Ellis, E. (2015, October 23). *Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/rs71013895>
- Deng, C., Wang, S., Huang, Z., Tan, Z., & Liu, J. (2014). Unmanned Aerial Vehicles for Power Line Inspection: A Cooperative Way in Platforms and Communications. <https://doi.org/10.12720/jcm.9.9.687-692>
- Die Brücke - highline179. (n.d.). Retrieved March 26, 2018, from <https://www.highline179.tirol/die-bruecke>
- DJI. (2014). Phantom 2 Vision – deine fliegende Kamera, Quadrocopter-Drohne für Luftbild- und Videoaufnahmen. Retrieved April 18, 2018, from <https://www.dji.com/de/phantom-2-vision>
- DJI. (2016). DJI Phantom 4 - Spezifikationen, FAQ, Tutorials und Downloads. Retrieved April 18, 2018, from <https://www.dji.com/de/phantom-4/info#specs>
- DJI. (2017). DJI Matrice 600 Pro Specs. Retrieved April 18, 2018, from <https://www.dji.com/matrice600-pro/info#specs>
- eppurca, pamihe, B. (n.d.). Longjiang bridge Hexacopter pilot line 20141212 龙江特大桥用无人机拖拽先导索 - YouTube. Retrieved April 12, 2018, from <https://www.youtube.com/watch?v=zGHcriT-M1M>
- FREEFLY. (2016). Freefly ALTA 8 Specifications - Dimensions, Weight & Payload. Retrieved March 20, 2018, from <https://freeflysystems.com/alta-8/specs>
- Galileo. (2015). *Galileo - Video - Die längste Hängebrücke Europas - ProSieben*. Retrieved from <https://www.prosieben.de/tv/galileo/videos/201524-die-laengste-haengebruecke-europas-clip>
- Guo, D., Zhou, W., Yu, Z., Xia, G., Li, X., Liu, W., ... Hu, M. (2014). Use of Rocket Traction Method to Span Pilot Rope for Long Span Suspension Bridge Construction in Mountainous Area. Retrieved from <http://docs.trb.org/prp/15-5164.pdf>
- Hackney, C., & Clayton, A. I. (2015). *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their*

- application in geomorphic mapping. Geomorphological Techniques.* University of Southampton, UK. Retrieved from https://eprints.soton.ac.uk/376639/1/2.1.7_UAV.pdf
- Jeremia, S., Kuantama, E., & Pangaribuan, J. (2012). Design and construction of remote-controlled quad-copter based on STC12C5624AD. *Proceedings of the 2012 International Conference on System Engineering and Technology, ICSET 2012*, 3–7. <https://doi.org/10.1109/ICSEngT.2012.6339317>
- Jiang, Q., & Kumar, V. (2013). The inverse kinematics of cooperative transport with multiple aerial robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(1), 136–145. <https://doi.org/10.1109/TRO.2012.2218991>
- Junxin, S., Bin, L., Yan, Z., Cui, L., & Kongling, C. (2014). Structural Design and Global Analysis of Main Bridge of Longjiang Bridge in Yunnan.
- Kanirope. (n.d.). Polyamidseil 3mm 100m Weiß PA Polyamid Schnur Kordel. Retrieved April 18, 2018, from <https://www.kanirope.de/polyamidseil-kanirope-nylonbraid-3mm-100m-spule-weiss-8-fach-geflochten>
- Kashima, S. (1998). *Technical advances in the Honshu-Shikoku bridges.* <https://doi.org/10.5169/seals-59828>
- Kim, M., Joo, H., & Jang, B. (2017). Conceptual multicopter sizing and performance analysis via component database. In *International Conference on Ubiquitous and Future Networks, ICUFN* (pp. 105–109). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICUFN.2017.7993756>
- Kitagawa, M. (2004). *Technology of the Akashi Kaikyo Bridge. STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING.* <https://doi.org/10.1002/stc.31>
- Kotarski, D., Benic, Z., & Krzmar, M. (2016). Control Design for Unmanned Aerial Vehicles with Four Rotors. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 14(2), 236–245. <https://doi.org/10.7906/indecs.14.2.12>
- Liang, O. (2015). Quadcopter VS Helicopter - Why not Scale Up, Full Size Drone - Oscar Liang. Retrieved March 30, 2018, from <https://oscarliang.com/quadcopter-helicopter-compare-cons-pro/>
- Liang, O. (2016). Types of Multicopter - Oscar Liang. Retrieved March 20, 2018, from <https://oscarliang.com/types-of-multicopter/>

- Öhlund, R. (2017). Drones and energy efficiency - SmartPlanes. Retrieved April 20, 2018, from <http://smartplanes.com/drones-and-energy-efficiency/>
- Palkowski S. (1990). *Statik der Seilkonstruktionen - Theorie und Zahlenbeispiele*. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-52319-9>
- Quan, Q. (2017). *Introduction To Multicopter Design and Control*. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3382-7>
- Sakowski, E. (2016). Longjiang Bridge - HighestBridges.com. Retrieved April 20, 2018, from http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Longjiang_Bridge
- Schlesinger, J., & Vogt, S. (2017). Whitepaper Drohneneinsatz im Wasserbau - Grundlagen, Datenformate und Anwendungsbereiche. Retrieved from http://www.svgeosolutions.de/images/pdf/svGeosolutions_Whitepaper_Drohneneinsatz_im_Wasserbau.pdf
- Shuo, W. (2015). 先导索过江 无人机帮忙 -. Retrieved March 26, 2018, from <http://bbs.chinabridge.org.cn/thread-9518-1-1.html>
- Takeno, M., Kishi, Y., Yoshioka, T., Hosokawa, H., & Okumoto, T. (1997). Cable erection technology for world's longest suspension bridge - Akashi Kaikyo Bridge. *Nippon Steel Technical Report*.
- Tatum, M. C., & Liu, J. (2017). Unmanned Aircraft System Applications in Construction. *Procedia Engineering*, 196(June), 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.187>
- timeanddate.de. (n.d.). Wetterrückblick München, Bayern, Deutschland – Wetter gestern & letzte Woche. Retrieved April 18, 2018, from <https://www.timeanddate.de/wetter/deutschland/muenchen/rueckblick>
- Wang, G., Hollar, D., Sayger, S., & Zhen, Z. (2016). Risk Considerations in the Use of Unmanned Aerial Vehicles in the Construction Industry, 6(May), 165–177. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3155.1525>

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

München, 17. Juli 2019

Haoran Li

Haoran Li

██████████

██████████████████

██████████████████████████████