



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Oliver Böhm

Entwicklung eines mobilen Verfahrens zur
(De)Montage von Rotorblättern einer Windenergie-
anlage ohne Verwendung aufwendiger Krantechnik

Oliver Böhm

**Entwicklung eines mobilen Verfahrens zur
(De)Montage von Rotorblättern einer
Windenergieanlage ohne Verwendung
aufwendiger Krantechnik**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

AREVA Blades GmbH
AREVA Composite Design Center
Johann-Rathje-Köser-Straße 7
21683 Stade

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Stefan Wiesemann
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Jörg Bäcker (AREVA Blades GmbH)

Abgabedatum: 2014-08-05

Zusammenfassung

Oliver Böhm

Thema der Bachelorarbeit

Entwicklung eines mobilen Verfahrens zur (De)Montage von Rotorblättern einer Windenergieanlage ohne Verwendung aufwendiger Krantechnik.

Stichworte

Windenergie, Windenergieanlage, Rotorblatt, Rotorblattinstallation

Kurzzusammenfassung

Für die (De)Montage von Blättern von Windenergieanlagen - onshore wie offshore - werden Systeme benötigt, die es ermöglichen dies auf eine möglichst einfache und sichere Art zu bewerkstelligen, ohne aufwendige Krantechnik einzusetzen. In dieser Arbeit werden, ausgehend vom Stand der Technik, bestehende Systeme recherchiert und weitere Lösungsmöglichkeiten erarbeitet. Nach einer Gegenüberstellung wird die am besten erscheinende Lösung weiter bearbeitet.

Oliver Böhm

Bachelor Thesis Title

Development of a technique for installing and uninstalling rotor blades on wind turbines without using complex crane equipment.

Keywords

Wind energy, wind turbine, rotor blade, rotor blade installation

Abstract

For the installation and deinstallation of wind turbine rotor blades - onshore as well as offshore - a system is needed to do this in a fashion both simple and safe, without using complex crane equipment. Starting from the status quo research into existing systems will be performed as well as development of new solutions. After a comparison of the systems found earlier the most promising one will be worked on further.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Rahmenbedingungen	5
2.1. Kurzbeschreibung	5
2.1.1. Zielsetzung	5
2.1.2. Umfang der Arbeit	5
2.2. Übersicht WEA und Rotorblatt	7
2.3. Anforderungsliste	10
2.4. Umweltrahmenbedingungen	11
2.5. Normen, Gesetze, ...	12
3. Markt und Stand der Technik	13
3.1. Sternmontage mit Kran	13
3.2. Einzelblattmontage mit Kran	15
3.2.1. Einzelblattmontage	15
3.2.2. C-Haken	15
3.2.3. Liftra Blade Dragon	16
3.2.4. Blatttraversen	16
3.2.5. Boom Based Blade Manipulator	18
3.3. Andere Kransysteme	19
3.3.1. Gamesa Flexifit	19
3.3.2. Vestas Tower Crane	19
3.4. Andere Montagesysteme	20
3.4.1. Aeolus II	20
3.4.2. Wind Lift Tower	21
3.5. Patente	23
3.6. Zusammenfassung	25
4. Lösungsfindung	27
4.1. Funktionsstruktur	27
4.2. Lösungssammlung für Teilfunktionen	30
4.2.1. Einleitung	30
4.2.2. Blatt heben und senken	30
4.2.3. Blatt führen	32

4.2.4.	Blatt halten	34
4.2.5.	Blatt am Boden aufnehmen oder entnehmen	36
4.2.6.	Blatt am Turm greifen oder freigeben	36
4.2.7.	Blatt drehen	37
4.2.8.	Blatt ein- und ausfädeln	38
4.3.	Suche von Gesamtlösungen	39
4.4.	Lösungsvorschläge	40
4.4.1.	Lösung A: Turmgeführter Greifer	40
4.4.2.	Lösung B: Hängender Greifer	51
4.4.3.	Lösung C: An Bolzen hängendes Blatt	56
4.5.	Bewertung der Lösungsvorschläge	60
4.5.1.	Bewertungskriterien	60
4.5.2.	Auswahl eines Vorschlags	61
5.	Weitere Bearbeitung	64
5.1.	Blatttauschverfahren BTV	64
5.1.1.	Übersicht	64
5.1.2.	Teilsysteme	66
5.2.	Betriebsablauf	68
5.2.1.	Drehen des Blattes	68
5.2.2.	Verhalten bei möglichen Störfällen	68
5.2.3.	Umweltbedingungen	69
6.	Ergebnis und Ausblick	71
A.	Tabellen	73
B.	Datenblätter	80

Abbildungsverzeichnis

1.1. Windenergieanlagen in Deutschland laut Bundesverband Windenergie	2
1.2. Leistung der Windenergieanlagen in Deutschland laut BWE	2
1.3. Größenwachstum von Windenergieanlage	3
2.1. Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren	6
2.2. Übersicht über eine Windenergieanlage (WEA)	8
2.3. Übersicht über ein Rotorblatt (M5000-116, AREVA Blades GmbH)	8
2.4. T-Bolzen eines Rotoblattes (M5000-116, AREVA Blades GmbH)	9
2.5. Schnittansicht eines Rotorblattes, von der Wurzel aus gesehen	9
3.1. Montage eines Rotorblattsterns einer Multibrid M5000-116 offshore von einer Jack-Up-Plattform aus	14
3.2. Montage eines Rotorblattes mit einem C-Haken	15
3.3. Liftra Blade Dragon	16
3.4. Einzelblattmontage mit einer Blatttraverse	17
3.5. Einzelblattmontage offshore von einer Jack-Up-Plattform aus	17
3.6. Boom Based Blade Manipulator	18
3.7. Hilfskran Gamesa Flexifit	19
3.8. Hilfskran Vestas Tower Crane	20
3.9. Montage von Gondel und Blättern der Aeolus II	21
3.10. Berg-Idl Wind Lift Tower in Zusammenarbeit mit dem Institut für Integrier- te Produktion Hannover (IPH)	22
3.11. Skizzen zu Patenten für die Einzelblattmontage	24
4.1. Funktionsstruktur Ebene 0	27
4.2. Ablauf- und Funktionsstruktur einer Blatttauschvorrichtung	29
4.3. Skizzen für Teilfunktion Heben und Senken	31
4.4. Skizzen für Teilfunktion Führen	33
4.5. Skizzen für Teilfunktion Führen bei Abstützung am Turm	34
4.6. Skizzen für Teilfunktion Halten	35
4.7. Skizzen für die Teilfunktion (Ent-)Laden am Boden	36
4.8. Skizzen für Teilfunktion Drehen	38
4.9. Skizzen für Teilfunktion Ein-/Ausfädeln	39
4.10. Skizze von Gesamtlösung A	42

4.12. Darstellung der aerodynamischen Auftriebs- und Widerstandskräfte des Blattes für 1m/s Anströmgeschwindigkeit, siehe Tabelle A.3	43
4.13. Darstellung der aerodynamischen Auftriebs- und Widerstandsmomente des Blattes für 1m/s Anströmgeschwindigkeit, siehe Tabelle A.4	44
4.14. Zur Bestimmung der Haltekräfte und Hebelarme	46
4.15. Skizze des Greiferwagens zur Bestimmung der Seilkraft und Kontaktkräften	50
4.16. Zur Bestimmung Kräfte auf den Turm	51
4.17. Skizze zu Gesamtlösung B	53
4.18. Anschraubpunkte für Sternmontage an der Nabe	54
4.19. Skizze des Greifmechanismus.	54
4.20. Querschnitt durch die Blattlagerung für Lösungsvariante C	57
4.21. Isometrische Ansicht für Lösungsvariante C	58
4.22. Ablauf (De)Montageverfahren Lösung C	59
5.1. Rückansicht der Nabe mit Ausleger und Umlenkrollen	65
5.2. Presshülse als Seilende	67
5.3. Abtransport eines Blattes	68

Tabellenverzeichnis

1.1. Betriebs- und Versicherungskosten von Windenergieanlagen bis ca. 3,5MW	3
3.1. Zusammenfassung des Standes der Technik verschiedener Montageverfahren	26
4.1. Morphologischer Kasten	40
4.2. Gegenüberstellung der Lösungen	62
4.3. Bewertung der Lösungsvorschläge	63
A.1. Installierte WEA in Deutschland	74
A.2. Installierte WEA-Leistung in Deutschland	75
A.3. Aerodynamische Auftriebs- und Widerstandskräfte des 56,5m-Blattes für eine Anströmgeschwindigkeit von 1m/s senkrecht zur Blattlängsachse . .	76
A.4. Aerodynamische Auftriebs- und Widerstandsmomente des 56,5m-Blattes für eine Anströmgeschwindigkeit von 1m/s senkrecht zur Blattlängsachse	78

1. Einleitung

Windenergieanlagen werden in ihrer heutigen Form seit den 1990er Jahren in Deutschland errichtet. Die Anzahl der neu installierten Windenergieanlagen nimmt in den letzten Jahren konstant zu (siehe Abbildung 1.1). Bei Betrachtung des Verlaufs der installierten Leistung über den selben Zeitraum kann man feststellen, dass diese stärker zunimmt, als die Anzahl der errichteten Anlagen (siehe Abbildung 1.2). Dies bedeutet, dass die durchschnittliche Leistung der Windenergieanlagen zunimmt. Die dem Wind entnehmbare Leistung, die eine Windenergieanlage maximal produzieren kann, ist proportional zur Fläche die von ihrem Rotor überstrichen wird [24]. Weiterhin sind die Windverhältnisse in größeren Höhen meist besser als in Bodennähe.

Deshalb geht der Trend dahin, dass neue Windenergieanlagen größer werden. Um den größeren Rotordurchmesser nutzen zu können, steigt auch die Nabenhöhe der Anlagen an (siehe dazu auch Abbildungen 2.2 und 1.3).

Die Errichtung der Anlagen erfordert den Einsatz aufwendiger Krane, mit denen Bauteile mit großer Windangriffsfläche in Höhen über 130m befördert werden können .

Für die Verwendung an Windkraftanlagen der 5MW-Klasse empfiehlt der Hersteller Liebherr beispielsweise Gittermast- oder Raupenkrane mit einer Nennlast von mindestens 750t beziehungsweise 1300t [27].

Krane dieser Größenordnung sind nur in begrenzter Anzahl verfügbar und daher weit im Voraus zu bestellen. Sie müssen üblicherweise in Einzelteilen auf mehreren LKW transportiert werden und können zum Aufbau mehrere Wochen benötigen. So hat der Kranaufbau für die Errichtung AREVA M5000-135 Testanlage bei Bremerhaven etwa eine Woche gedauert. Der dort verwendete Kran wurde auf etwa 40 LKW verteilt transportiert.

Offshore werden Schwimmkrane, Errichterschiffe und Jack-Up-Plattformen¹ mit oder ohne eigene Krantechnik verwendet. Bei solchen ohne eigene Krane werden Raupen- oder Gittergestellkrane an Bord errichtet.

Mit der Multibrid M5000-116 stellt die Firma AREVA Wind Windenergieanlagen mit einer Nennleistung von 5MW für den Offshoreeinsatz her (Nordsee-Windparks Alpha

¹Errichterschiffe und Jack-Up-Plattformen werden zum Einsatzort gefahren, hieven sich mit Stelzen über die Wasseroberfläche und bilden so eine stabile Plattform (siehe dazu Abb. 3.1).

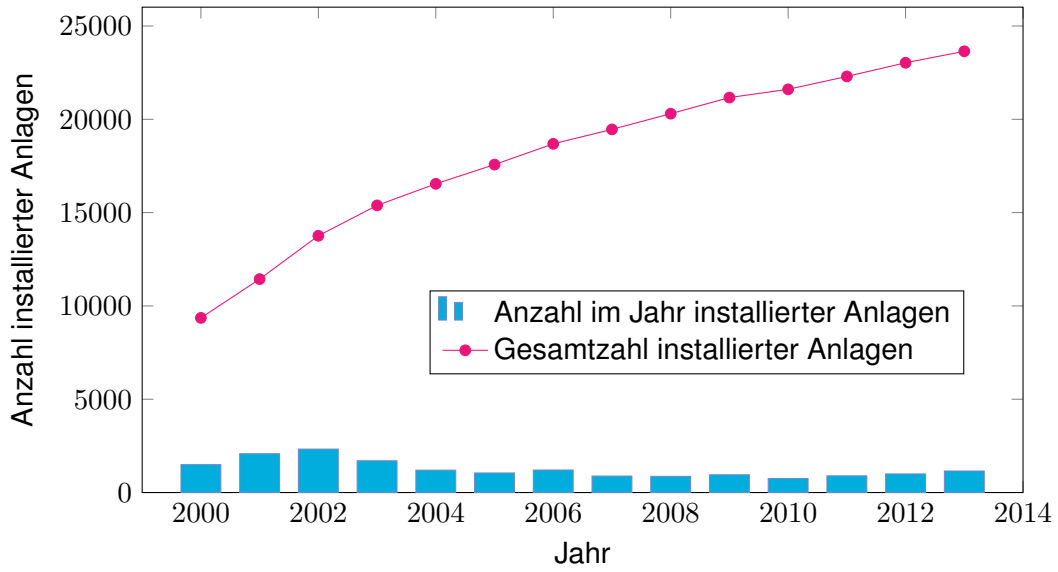


Abbildung 1.1.: Windenergieanlagen in Deutschland laut Bundesverband Windenergie [21], siehe Tabelle A.1

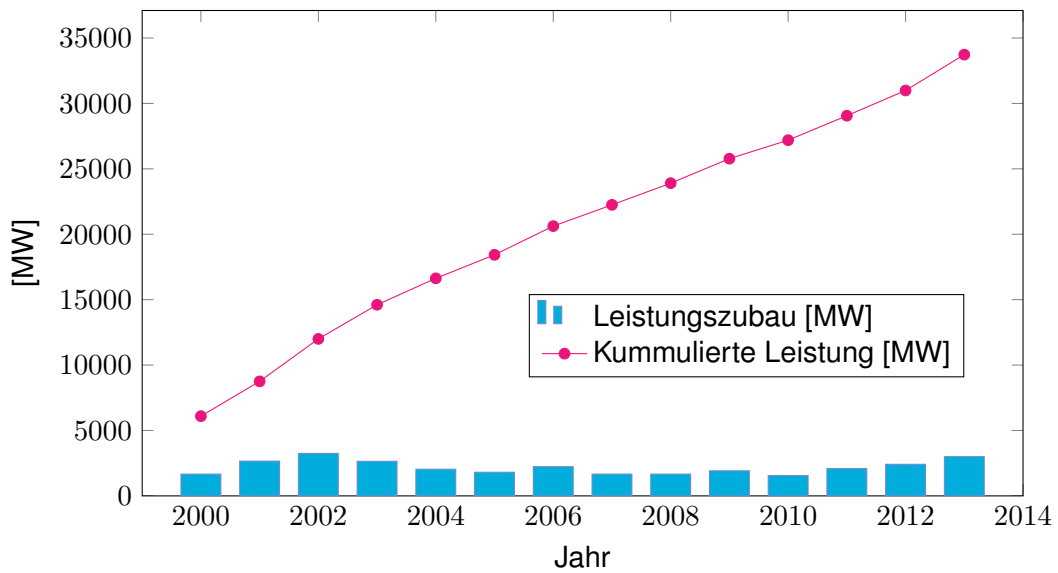


Abbildung 1.2.: Leistung der Windenergieanlagen in Deutschland laut BWE [21], siehe Tabelle A.2

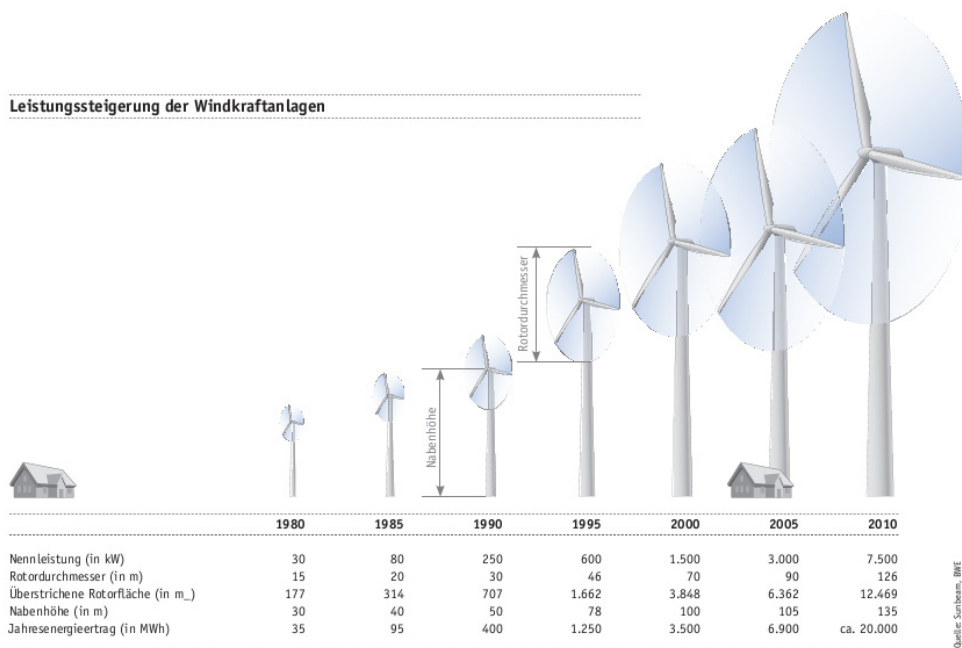


Abbildung 1.3.: Größenwachstum von Windenergieanlagen [19]

Tabelle 1.1.: Betriebs- und Versicherungskosten von Windenergieanlagen bis ca. 3,5MW [13]

	Alter [a]	Kosten	Anteil an Betriebskosten
Wartungs- und Reparaturkosten	1...10	1,05ct/kWh	44%
	11...20	1,47ct/kWh	55%
Versicherungskosten	1...10	0,12ct/kWh	3%
	11...20	0,07ct/kWh	3%

Ventus, Globaltech 1 oder Borkum West II, dazu Testanlagen onshore im Raum Bremerhaven). Die 56,5m langen Rotorblätter werden von der AREVA Blades GmbH produziert. Die Anlage und ihre Rotorblätter fallen somit in die Kategorie von Anlagen, die den Einsatz größter Krane erforderlich macht.

Alte Anlagen haben eine ähnliche zeitliche Verfügbarkeit wie neu errichtete. Diese liegt bei etwa 97% [24] [26]. Ein einzelner drei Monate dauernder Ausfall in zehn Jahren verringert so die zeitliche Verfügbarkeit von 97% auf 94,8%. Allerdings dauern Ausfälle bei älteren Anlagen länger als bei neu errichteten [15]. Die energetische Verfügbarkeit ist dazu noch geringer als die zeitliche, da Ausfälle in zu windreichen Zeiten häufiger sind als in solchen mit weniger starkem Wind [12]. Je nach Anlage, Jahreszeit und Windverhältnissen bedeutet ein Anlagenstillstand von zehn Wochen einen Ertragsausfall von

20 000€ bis mehr als 50 000€ [20]. Hinzu kommen die Kosten eventueller Reparaturmaßnahmen.

Mit den oben dargestellten Tatsachen erscheint es sinnvoll eine Möglichkeit zu haben den Engpass, den Großkräne derzeit darstellen, zu umgehen. Wartungs- und Versicherungskosten machen einen großen Teil der Betriebskosten einer Windenergieanlage aus (Tabelle 1.1) und Reparatur bedeuten einen Stillstand der Anlage und somit einen Ertragsausfall. Weiterhin kann ein schnell verfügbares und einfaches System für den Blatttausch als Anreiz für Kunden dienen, denen eine hohe Sicherheitsbewertung wichtig ist.

Daher wird in dieser Bachelorarbeit ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, Rotorblätter zu montieren und zu demontieren, ohne auf den Einsatz großer Krane angewiesen zu sein. Auf diese Art sollen Reparatur- und Versicherungskosten reduziert werden. Außerdem sollen Ausfallzeiten durch das Vermeiden des Einsatzes von Großkränen verkürzt werden. Dadurch würde ein Ertragsausfall reduziert werden, was im Sinne des Anlagenbetreibers ist.

Das System soll dabei nicht fest an der Anlage montiert werden, sondern mobil sein, d.h. im Bedarfsfall zügig zum Einsatzort transportiert werden können. Für das Blatt(de)montageverfahren wird eine Lösungsfindung durchgeführt. Die am besten erscheinende Lösung wird in einer Vorauslegung genauer spezifiziert. Dabei werden wesentliche Teilsysteme skizziert. Außerdem findet eine Abschätzung der zu erwartenden Lasten und vorzunehmender Veränderungen an einer Windenergieanlage statt.

Dies soll als Ausgangspunkt für eine weitere Produktentwicklung dienen können.

2. Rahmenbedingungen

Als erstes wird das Ziel der Arbeit vorgestellt. Nach einer Eingrenzung des Umfangs der Arbeit folgt eine Übersicht über den Aufbau einer Windkraftanlage und eines Rotorblattes. Dies dient zur Orientierung um die im weiteren Verlauf wiederkehrenden Begriffe einordnen zu können.

Die technischen Anforderungen an das Verfahren werden aufgelistet. Als letztes erfolgt eine Übersicht darüber, welche Normen, Richtlinien und Gesetze bei einer Realisierung des hier gemachten Vorschlags relevant sein können.

2.1. Kurzbeschreibung

2.1.1. Zielsetzung

Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren soll ein einzelnes Rotorblatt einer Windenergieanlage (WEA) entfernt, bzw. an ihr montiert werden. Der Einsatz von Kranen soll dabei auf solche beschränkt werden, die notwendig sind, um das Blatt in die in dieser Arbeit vorgestellte Vorrichtung zu heben oder es aus ihr zu entnehmen. Ein solcher Kran hat dabei eine wesentlich geringere Größe als ein Kran mit dem ein Rotorblatt direkt (de-)montiert werden kann. Beim Tausch eines Blattes wird zunächst die gesamte Konstruktion an der Anlage montiert. Eine Transporteinheit wird von unten in Richtung Gondel verfahren. In einer oberen Endposition übernimmt die Vorrichtung das montierte Blatt. Die Verbindungsbolzen zwischen Rotorblatt und Nabe werden nun gelöst. Das Blatt wird aus der Nabe heraus- und danach heruntergefahren. In einer möglichst niedrigen Position wird das Rotorblatt so gedreht, dass es zur Lagerung am Boden bewegt werden kann. Dies geschieht beispielsweise durch einen kleineren Kran mit etwa 350t Nennlast. Die Montage eines Blattes erfolgt in entsprechend umgekehrter Reihenfolge.

2.1.2. Umfang der Arbeit

In Abbildung 2.1 ist dargestellt, wie die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik nach VDI gegliedert ist. Mit diesem Ablaufdiagramm als Orientierung findet der Lösungs-

findungsteil der Arbeit statt. Diese Arbeit wird in Anlehnung an die Phasen I und II durchgeführt. Die folgenden Schritte können im Rahmen einer Realisierung umgesetzt werden.

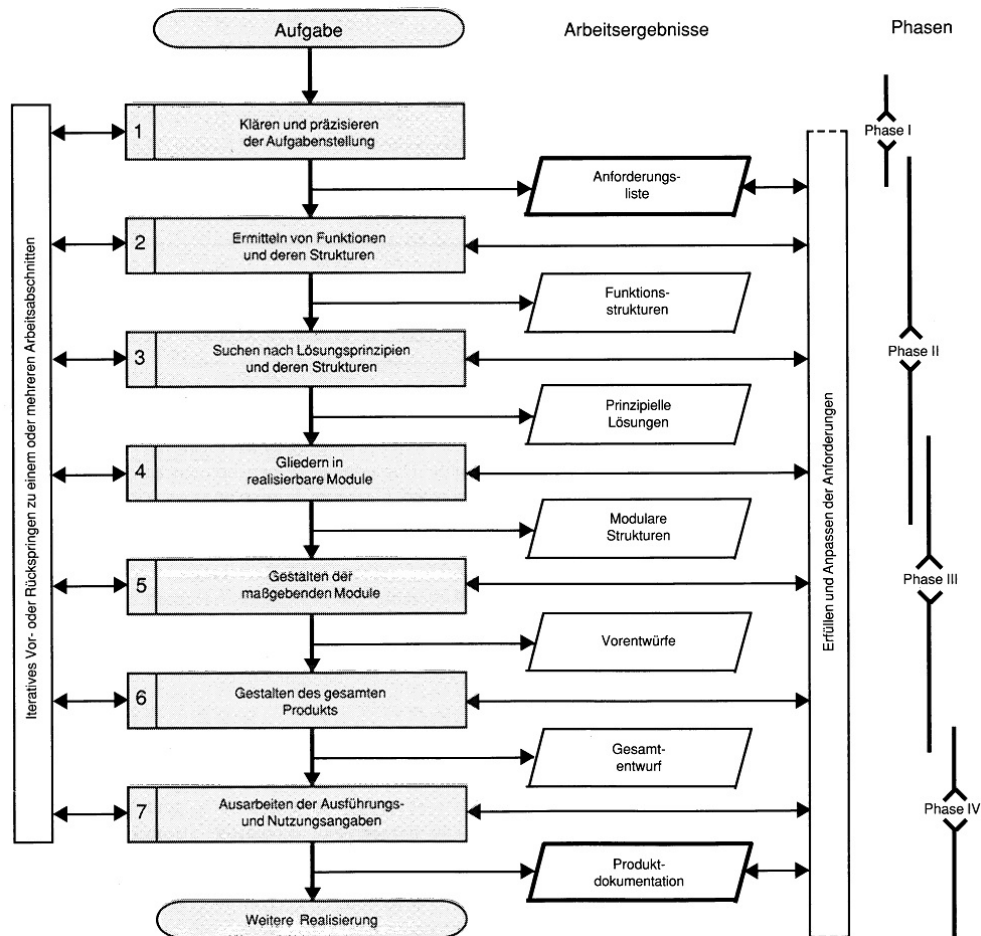


Abbildung 2.1.: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [11]

Zur Lösungsfindung werden zunächst Randbedingungen, die einen Einfluss auf die Montage oder Demontage eines Rotorblattes haben können in einer Anforderungsliste aufgestellt. Diese sollen zum einen als Grenzwerte, aber auch als Richtlinien zur späteren Auslegung dienen. Nach der Festlegung der Rahmenbedingungen wird geklärt, ob besondere Normen und Richtlinien zu beachten sind, durch die ein Vorentwurf in seiner Gestaltung eingeschränkt werden könnte.

Darauf folgend wird der Stand der Technik gezeigt. Dabei werden die bekannten Montageverfahren, sowie patentierte Neuentwicklungen mit dem selben, oder nahe verwandten Anwendungsgebieten, vorgestellt.

Nach der Aufteilung in Funktionsgruppen werden verschiedene Lösungsansätze für die einzelnen Teilfunktionen gesammelt. Durch Kombination verschiedener Teillösungen werden drei Gesamtlösungsvorschläge gefunden und deren Gültigkeit als Lösung

durch einfache Rechnungen nachgewiesen. In einer Gegenüberstellung findet eine Bewertung der Lösungen statt. Die dabei als am Besten befundene Lösung wird in der weiteren Bearbeitung detailliert.

2.2. Übersicht über Windenergieanlage und Rotorblatt

Eine Windenergieanlage kann in mehrere Baugruppen unterteilt werden. Auf dem Fundament steht der Turm. An Land („onshore“) besteht dieser meist aus Beton- oder Stahlrohr. Auf See („offshore“) werden verschiedene Gründungen verwendet, die aber meist aus Stahl sind. Auf dem Turm findet man die um die Vertikale drehbare Gondel. In ihr befinden sich Maschinenteile wie Getriebe, Generator, Bremsen und Rotorlager. Außerdem ist dort ein Bordkran untergebracht mit dem Maschinenteile in oder zur Gondel gehoben werden können. Die meisten WEA sind Luvläufer, d.h. der am Rotorlager angebrachte Rotor steht vor der Gondel im Wind. Bei den selteneren Leeläufern, ist der Rotor in Windrichtung hinter der Gondel zu finden. Der Rotor besteht bei modernen Anlagen aus drei Rotorblättern die an der Nabe befestigt sind. Die Verbindung zwischen Nabe und Rotorblatt ist bei der vorliegenden Anlage durch je ein angetriebenes Pitchlager realisiert. Dadurch lässt sich der Anstellwinkel der Rotorblätter anpassen um zu einer Windgeschwindigkeit die optimale Energieausbeute zu erhalten.

Für die Stellung eines Rotorblattes wird häufig eine Uhrzeit-Angabe verwendet. Dazu blickt man von vorne auf den Rotor. Die 12-Uhr-Position weist demnach senkrecht nach oben, die 3-Uhr-Position nach rechts. Positionsangaben in Bezug auf die Anlage werden hier relativ zur Gondel gemacht. „Vor der Anlage“ ist demnach Luvseitig (im rechten Teil der Abbildung 2.2 links).

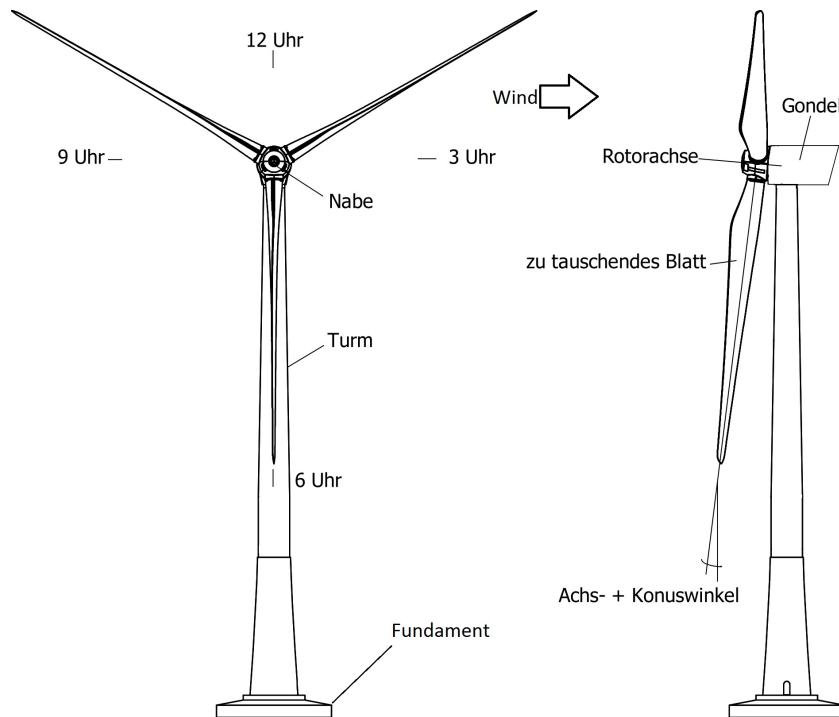


Abbildung 2.2.: Übersicht über eine Windenergieanlage (WEA)

In Abbildung 2.3 ist ein Rotorblatt der Multibrid M5000-116 dargestellt. An diesem sollen die Überlegungen zum Blatt(de)montageverfahren stattfinden. Die Blattlängsachse wird mit x bezeichnet. Positionen entlang dieser Achse werden als Längen angegeben, etwa $L16,5m$ für den Schwerpunkt. In einer mathematischen Umgebung ist dies $x_S = 16,5m$. Eine zweite Art der Längenangabe entlang der Blattlängsachse ist der Radius. Dieser bezieht sich auf den Punkt an dem sich die drei Blattachsen auf der Rotorachse kreuzen. Der Blattflansch befindet sich $1,5m$ von diesem Punkt entfernt. Daher ist $L16,5m = R18m$. Im folgenden wird explizit darauf hingewiesen, falls eine Radiusangabe verwendet wird.

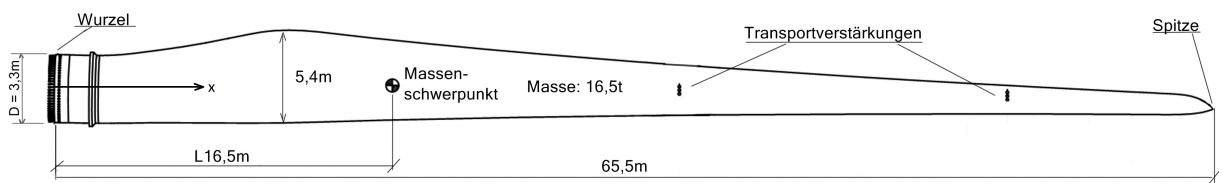


Abbildung 2.3.: Übersicht über ein Rotorblatt (M5000-116, AREVA Blades GmbH)

Das Blatt wird mittels einer T-Bolzenverbindung an seiner Wurzel (Abbildung 2.4) am Pitchlager¹ befestigt, mit dem es auf den optimalen Anstellwinkel gedreht wird. Die T-Bolzen bestehen aus Querbolzen in der Blattwurzel und Dehnbolzen die in sie hereinge-

¹Die Begriffe (Pitch-)Lager und Nabe werden im folgenden Verlauf der Arbeit meist synonym verwendet.

schraubt werden. Die Dehnbolzen werden durch Bohrungen im Pitchlager eingefädelt und verschraubt.



Abbildung 2.4.: T-Bolzen eines Rotorblattes (M5000-116, AREVA Blades GmbH)

Einen Querschnitt durch ein Rotorblatt zeigt Abbildung 2.5. Dort sind alle wichtigen Komponenten, die ein Blatt kennzeichnen, eingetragen. Die Funktion des Rotor entsteht durch das Flügelprofil, das von der Schale gebildet wird. Die üblicherweise angeströmte Seite wird Nase genannt, diejenige, an der die Strömungen wieder zusammenlaufen, Endkante. Das Blatt ist vereinfacht dargestellt ein einseitig eingespannter Kragbalken bestehend aus zwei I-Trägern. Die durch den Betrieb verursachten Kräfte werden durch die Gurte aufgenommen. Schubkräfte werden von den Stegen übertragen die zwischen den Gurten stehen. Wegen der Bauweise sind äußere Kräfte bevorzugt über die Gurtbereiche auf das Blatt zu übertragen. Dies ist nur eine Art des Aufbaus eines Rotorblattes. Verschiedene Hersteller bauen unterschiedliche Varianten. Es ist jedoch die Bauform die in dieser Arbeit vorausgesetzt wird. Die Schnittansicht

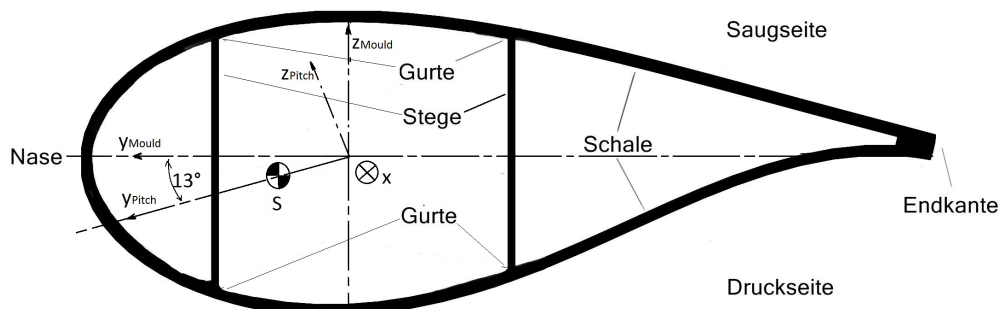


Abbildung 2.5.: Schnittansicht eines Rotorblattes, von der Wurzel aus gesehen

zeigt schematisch auch die Lage des Schwerpunktes und der zwei wesentlichen Koordinatensysteme im Rotorblatt. Das Mouldsystem („Formsystem“) hat seine y-Achse zur Nase und die z-Achse zwischen den Stegen zur Saugseite hin zeigend. Das Pitchsystem wird hier für Rechnungen der Aerodynamik verwendet. Der Pitchwinkel (Anstellwinkel) $\alpha = 0^\circ$ zeigt in Richtung Druckseite der Vorderkante. Ein Pitchwinkel von 13° entspricht für Zwecke dieser Arbeit dem Mouldsystem.

2.3. Anforderungsliste

In diesem Abschnitt werden die technischen Rahmenbedingungen, die von der Vorrichtung erfüllt werden müssen, aufgeführt. Darunter sind auch Vorgaben an den Zustand der Anlage an der das Blatt de-/montiert werden soll. Außerdem werden einige für die Berechnung zu verwendende Sicherheitsfaktoren vorgegeben. Diese wurden so auch für andere Hilfskonstruktionen verwendet.

- (a) zu beachtender Turmdurchmesser: sich ändernd, $D_{Turm} = 6m \cdots 4m$.
- (b) Zu transportierende Blattmasse: bis zu $m_{Blatt} = 16,5t$. Stoßfaktor beachten!
- (c) Blattschwerpunkt bei $L_{S,Blatt} = 16,5m$ von der Wurzel, $R_{S,Blatt} = 18m$ von der Rotorachse.
- (d) Maximale Projektionsfläche des Rotorblattes: $A_{P,Blatt} = 250m^2$.
- (e) Achs- + Konuswinkel der Anlage: $\gamma = 7^\circ$, siehe Abb. 2.2.
- (f) Die Rotorbremsen sind aktiv.
- (g) Der Azimut-Winkel der Anlage ändert sich nicht.
- (h) Das Pitchlager des Blattes ist drehbar, um die Montage zu vereinfachen.
- (i) Der Bordkran der Anlage steht zur Verfügung.
- (j) Fahrzeugkräne mit bis zu 350t Nennlast dürfen vorgesehen werden.
- (k) Rotorblätter werden von unten her montiert, bzw. nach unten hin demontiert. D.h. der Anlagenrotor ist so ausgerichtet, dass das zu (de)montierende Blatt auf der 6-Uhr-Position steht (siehe Abbildung 2.2).
- (l) Das Rotorblatt wird in der unteren Endposition mit einem Kran in die Vorrichtung eingesetzt bzw. von ihr entnommen.
- (m) Das Rotorblatt soll in der unteren (Ent-)Ladeposition waagrecht ausgerichtet sein. Dies bedeutet, dass das Blatt zur Montage gedreht werden muss.

- (n) Positioniergenauigkeit beim Montieren eines Blattes an einer Anlage: Bolzenloch mit $D = 39\text{mm}$, Dehnbolzen mit Gewinde $M36$.
- (o) Krafteinleitung in das Blatt nach Möglichkeit über seine Gurte.
- (p) Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung: 1,5 gegen plastische Verformung, 2 gegen Versagen, 5 gegen Knicken und Beulen.
- (q) Flächenpressungen am Blatt: maximal 2N/mm^2 im Gurtbereich und $0,25\text{N/mm}^2$ an anderen Bereichen des Blattes.
- (r) Das Blatt soll mittels Reibschluss an der Vorrichtung gehalten werden können (Reibkoeffizient darf mit $f = 0,3$ angenommen werden). Lässt es sich nicht vermeiden, sind Anschlagpunkte zulässig.
- (s) Für Hubvorgänge gilt in Abwesenheit anderer Sicherheitsbeiwerte ein Stoßfaktor von 2,5.
- (t) Die gesamte Vorrichtung muss in ISO-Containern mittels LKW transportiert werden können
- (u) Das System muss fernsteuerbar sein.
- (v) Kollisionen mit der Anlagenstruktur, außer vorgesehenen Kontakten (z.B. zur Führung), müssen vermieden werden.
- (w) Bauliche Veränderungen an Anlagen sind zulässig, sollten aber einen möglichst geringen Umfang haben.

2.4. Umweltraahmenbedigungen

Die Montage und Demontage eines Rotorblattes einer Anlage soll bei den im Folgenden dargestellten Umweltbedingungen möglich sein. Um einen Einfluss von Wellengang auf das Verfahren auszuschließen wird für den Offshoreinsatz davon ausgegangen, dass eine Jack-Up-Plattform benutzt wird.

- (a) Rauigkeitsklasse für Windgeschwindigkeiten: onshore: 2, offshore: 0
- (b) Windgeschwindigkeit: max. 14m/s
- (c) Windrichtungsänderung: $\pm 30^\circ$
- (d) Umgebungstemperatur: $-20^\circ\text{C} \dots 50^\circ\text{C}$
- (e) Betrieb bei Regen soll möglich sein

Die Konformität des Verfahrens mit diesen Vorgaben wird erst mit einer nach dieser Arbeit erfolgenden Detailauslegung bestätigt werden können. Bis dahin dienen die angegebenen Werte dazu Windlasten abzuschätzen und die Auswahl von Maschinenkomponenten einzugrenzen.

2.5. Normen, Gesetze, Richtlinien und Vorschriften

In diesem Abschnitt werden verschiedene Gesetze, Normen und Richtlinien gesammelt, die für die Entwicklung und den Betrieb der fertigen Konstruktion relevant sein können. Einige Richtlinien und Verordnungen sind, trotz ihres Namens oder Inhaltes, nicht auf den Gegenstand dieser Arbeit anzuwenden.

Die Vorrichtung, mit der ein Rotorblatt getauscht werden soll, wird der Maschinenverordnung [17] und der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG [23] folgen müssen. Dazu sind zum Zeitpunkt des *in den Verkehr bringes* eine Risikobeurteilung, sowie CE-Konformitätserklärungen abzugeben. Weiterhin muss eine technische Dokumentation sowie eine Betriebs- und Montageanleitung beigefügt sein.

Für Kran- und Huboperationen ist die DIN EN 13000 relevant, sie konkretisiert Anforderungen der EU-Maschinenrichtlinie. Im vorliegenden Fall ist dies für die Abschätzung von Windlasten interessant.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Gerät ist weder ein Aufzug im Sinne der Aufzugsverordnung, §1,2 [18] noch ein Bauaufzug nach BGR500, Kapitel 2.30, Abschnitt 1.2, Punkt 2 [1].

GL2012: Seite 4-78, Abs. 4.D.9 Limiting Conditions for maintenance, transport and installation gibt verschiedene Parameter als Grenzwert für Wartungs- und Installationsoperationen an. Technisch relevant wird für die vorliegende Aufgabenstellung nur die höchste zu erwartende Windgeschwindigkeit V_T sein, mit Einschränkungen auch die erlaubte Lufttemperatur. Der Wasserstand und die signifikante Wellenhöhe werden als nicht relevant angenommen, da für die Rotorblattmontage offshore der Einsatz einer Jack-Up-Plattform angenommen wird.

Die Realisierung des Verfahrens wird die Zusammenarbeit mit Firmen des Sondermaschinenbaus und Zertifizierungsstellen erfordern.

3. Markt und Stand der Technik

Bevor nach Lösungen für die Aufgabenstellung gesucht wird, soll der Stand der Technik zusammengefasst werden. Dazu wird eine Marktübersicht über verschiedene Montageverfahren im Bereich der Windenergie erstellt. Die Verfahren werden kurz beschrieben und deren wesentliche Vor- und Nachteile genannt. Zusätzlich zur Suche nach bereits realisierten Verfahren wird in einer Patentrecherche nach nicht umgesetzten anderen Lösungen gesucht.

Nicht alle vorgestellten Verfahren dienen der Montage einzelner Rotorblätter. Sie werden dennoch mit aufgeführt, da aus ihnen Ideen entstehen, oder Teilaspekte des Problems durch sie gelöst werden können (Kapitel 4).

Die gesammelten Verfahren bieten eine Übersicht über den Stand der Technik. Dies hilft einerseits dabei neue Lösungsideen zu finden und diese technologisch einzuordnen, andererseits soll ausgeschlossen werden, dass eine Wiederholung bereits bekannter Verfahren stattfindet.

3.1. Sternmontage mit Kran

Bei der so genannten Sternmontage werden die Rotorblätter einer Windenergieanlage bereits am Boden über die Pitchlager mit der Nabe verbunden. Zusammen mit den Blättern bildet die Nabe den so genannten Stern. Dieser wird dann mit einem Großkran zur bereits auf dem Turm installierten Gondel gehoben. Dazu werden je nach Konstruktionsart noch kleinere Fahrzeugkrane verwendet, zum einen, um die Blätter an der Nabe zu befestigen, zum anderen um den Stern bei dessen Installation zu führen.

Kräne müssen üblicherweise etwa 15m über die Höhe reichen in der die Last installiert werden soll. Dies bedeutet, dass bei der Sternmontage von Anlagen der Größe der AREVA Wind / Multibrid M5000-116 eine Kranhöhe von 150m erforderlich ist. Bei der Sternmontage muss im Gegensatz zu Einzelblattmontageverfahren zusätzlich noch die mehr als dreifache Masse gehoben werden. Außerdem sind die angreifenden Windkräfte größer als bei der Einzelblattmontage. Der Vorteil ist, dass die gesamte Rotorinstallation in einem Hub erledigt wird.

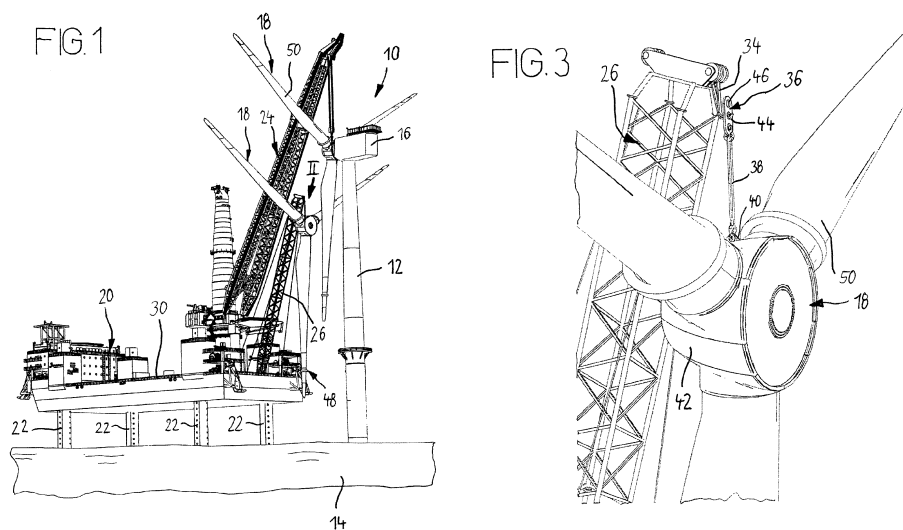


Abbildung 3.1.: Montage eines Rotorblattsterns einer Multibrid M5000-116 offshore von einer Jack-Up-Plattform aus [7], [22]

3.2. Einzelblattmontage mit Kran

3.2.1. Einzelblattmontage

Bei der Einzelblattmontage wird ein Rotorblatt zur Zeit montiert. Dies hat den Vorteil, dass die zu hebenden Lasten geringer sind als bei der Sternmontage. Dem gegenüber steht, dass in der Regel zwei zusätzliche Hebevorgänge erforderlich sind. Soll nur ein Blatt getauscht werden, so bietet es sich an eines der folgenden Verfahren zu verwenden.

3.2.2. C-Haken

Der C-Haken ist eine einfache Vorrichtung, die eine Einzelblattmontage ermöglicht. Ein Rotorblatt wird mit seinem Schwerpunkt in den C-Haken eingelegt. An diesem wird das Blatt zur Gondel mit bereits installierter Nabe hochgehoben. Das Blatt wird meist in einer waagerechten Position mit der Nabe verbunden. Nach der Montage eines Blattes wird der Rotor weitergedreht, um das nächste Blatt zu installieren. Zum Weiterdrehen sind Hilfsmittel erforderlich. Auch für die Einzelblattmontage wird zumindest ein Großkran gebraucht. Dessen Nennlast kann etwas niedriger sein als bei der Montage eines kompletten Rotorsterns. Dennoch ist deren Verfügbarkeit immer noch geringer als die kleiner Autokräne bis 350t Nennlast.



Abbildung 3.2.: Montage eines Rotorblattes mit einem C-Haken [6]

3.2.3. Liftra Blade Dragon

Die Blade Dragon genannte Maschine der Firma Liftra wurde in Zusammenarbeit mit AREVA Wind entwickelt (Abb. 3.3). Sie ermöglicht die Handhabung eines Rotorblattes mit nur einem Kran. Das Verfahren stellt eine Variante der Einzelblattmontage dar. Der Blade Dragon umgreift das Blatt an Punkten vor und nach der größten Blatattiefe. Das Blatt kann in seiner Sehnenebene¹ rotiert werden.



Abbildung 3.3.: Liftra Blade Dragon [8]

3.2.4. Blatttraversen

Um Rotorblätter unter Einsatz eines einzelnen Kranes heben zu können, werden Blatttraversen verwendet. Diese greifen üblicherweise vor sowie hinter dem Schwerpunkt entlang der Längsachse des Blattes an. Das Blatt wird dabei gegen Verdrehen und Längsbewegungen gesichert. Traversen, wie das in Abbildung 3.4 gezeigte Modell der Firma Ematec (im Auftrag des Windkraftanlagenherstellers Nordex), ermöglichen es das Blatt am Kran hängend um seine Pitch-/Längsachse zu rotieren. Dadurch können Lager- und Einbauposition variieren.

In Abb. 3.5 ist eine Greiftraverse zu sehen mit der ein einzelnes Blatt in der 3-Uhr-Position installiert werden kann.

¹Die Sehnenebene ist dabei die Ebene des Blattes, die durch seine Profilsehnern aufgespannt wird.



Abbildung 3.4.: Einzelblattmontage mit einer Blatttraverse [4]



Abbildung 3.5.: Einzelblattmontage offshore von einer Jack-Up-Plattform aus [3]

3.2.5. Boom Based Blade Manipulator

Der Boom Based Blade Manipulator (BBBM) ist eine Traversenkonstruktion. Das Blatt wird an einer Traverse angehoben. Am hebenden Kran befindet sich eine Laufkatze mit einer zweiten Seilwinde. Durch diese kann das Blatt in Richtung Kranausleger gezogen werden. Diese Vorrichtung soll eine gute Kontrolle über das Blatt ermöglichen. Der große Nachteil dabei ist, dass auch hier ein Kran gebraucht wird, der das Blatt bis auf Nabenhöhe heben kann.

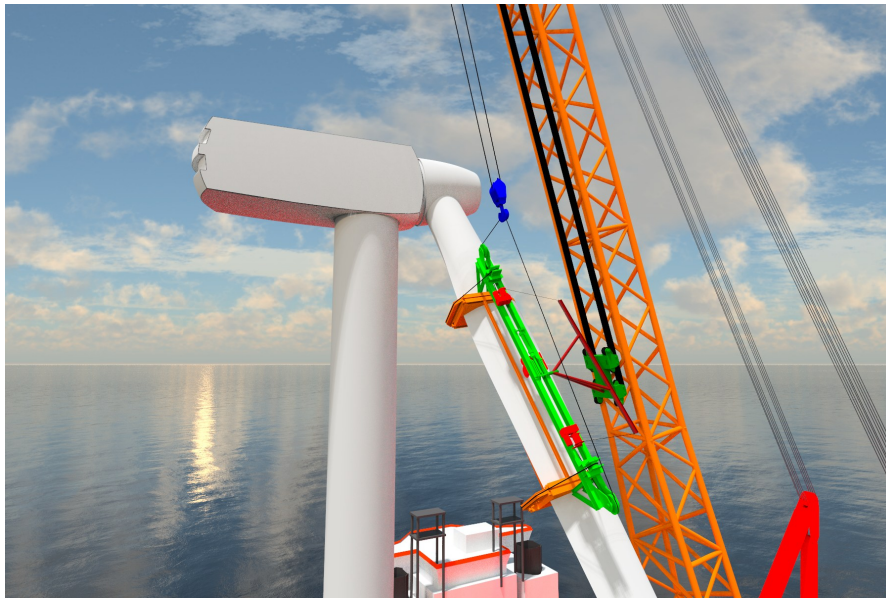


Abbildung 3.6.: Boom Based Blade Manipulator [29]

3.3. Andere Kransysteme

3.3.1. Gamesa Flexifit

Der spanische Windkraftanlagenhersteller Gamesa hat einen extern angebrachten mobilen Hilfskran für kleinere Anlagen entwickelt. Der Kran wird an der Rückseite der Anlage von der Gondel aus bis unter den Gondelboden gehoben und dort fixiert. Schwere Ersatzteile (z.B. Getriebe oder Generatoren) werden hinter der Anlage hochgezogen. Oben angekommen schwenken die Kranarme das Teil über das geöffnete Gondeldach um es im Maschinenhaus abzusetzen.



Abbildung 3.7.: Hilfskran Gamesa Flexifit

Dieser Kran eignet sich dazu, schwere Maschinenteile zur Gondel zu heben. Um große Teile wie ein Rotorblatt zu heben reicht der Ausleger nicht weit genug.

3.3.2. Vestas Tower Crane

Der Tower Crane genannte Kranprototyp des Windkraftanlagenherstellers Vestas ist ein externer Hilfskran (Abb. 3.8). Der Kran wird dazu verwendet Anlagenteile wie den Generator in die Anlage zu heben, wenn der vorhandene Bordkran zu klein ist. Er wird, auf mehrere LKW verteilt, zum Einsatzort transportiert. Mit dem Bordkran wird ein System von Umlenkrollen zur Gondel gezogen. Daran wird der eigentliche Kran in Richtung Turm gehoben. Greifarme umschließen den Turm um das System abzusichern. Der Kran wird am Turm laufend bis zur Gondel hochgezogen.

Wenn die Endposition erreicht ist, stellt dieser Kran eine stabile Plattform dar, um Komponenten zu heben, die vom Bordkran nicht bewältigt werden können. Um große Bauteile wie Rotorblätter mit Längen von über 56m heben zu können, ist dieser Kran zu klein.



Abbildung 3.8.: Hilfskran Vestas Tower Crane

3.4. Andere Montagesysteme

3.4.1. Aeolus II

Aeolus II war eine 3MW Anlage mit einem Zweiblattrotor. Inbetriebnahme war 1993. Die Besonderheit dieser Anlage ist, dass sie über eine eigene Montagevorrichtung zur Installation der Gondel verfügte. Wie in Abb. 3.9 erkennbar, wurden Gondel und Rotor vormontiert mittels eines Schienensystems in vertikaler Ausrichtung am Turm hochgehoben. Oben angekommen wurden Gondel und Rotor auf das Azimutlager gekippt. Vorteil dieser Konstruktion ist die einfache und sichere Montage schwerer Maschinenteile (Gondel und Rotor wogen mehr als 160t). Im Hinblick auf die vorliegende Aufgabenstel-

lung ist der wesentliche Nachteil, dass es sich hier um eine fest installierte Vorrichtung handelt.

Aeolus II lief bis 2008 über einen Zeitraum von 15 Jahren.

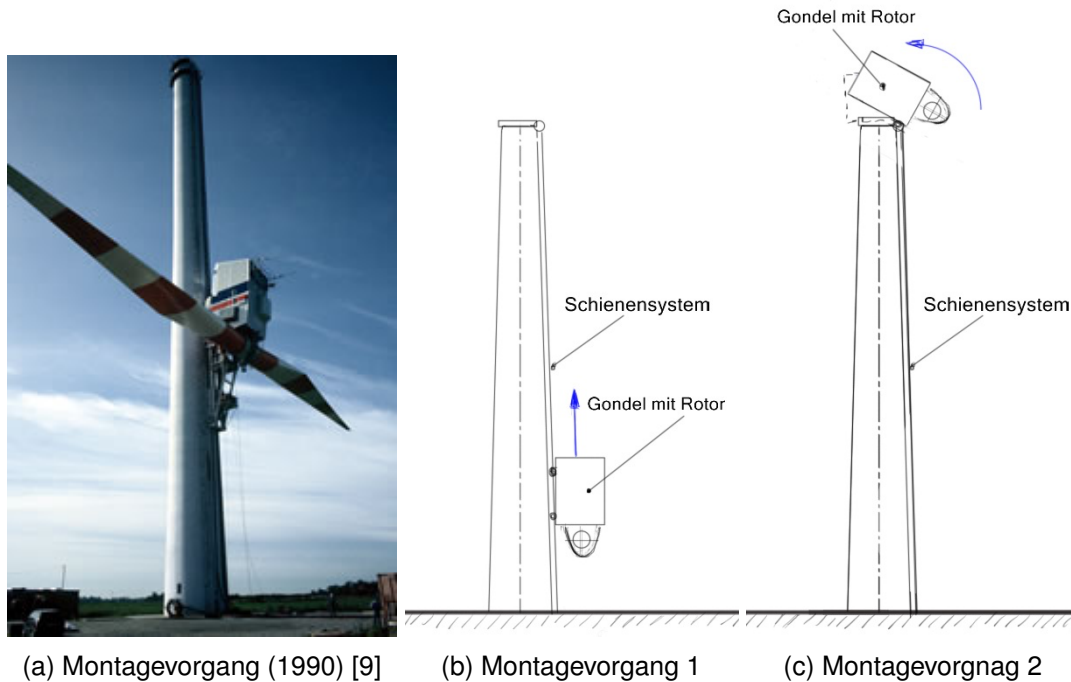


Abbildung 3.9.: Montage von Gondel und Blättern der Aeolus II

3.4.2. Wind Lift Tower

Der so genannte Wind Lift Tower, der in Kooperation des Instituts für Integrierte Produktion Hannover und der Berg-Idl GmbH entwickelt wurde (siehe Abb. 3.10), besteht im wesentlichen aus einem temporär am Anlagenturm zu errichtenden Gitterturm. Wie Gittermastkrane errichtet sich dieser ohne Hilfskran. Nach der Errichtung des Turms wird die Gondel mit zwei montierten Blättern nach oben gefahren und installiert. Das letzte Blatt wird mit einer Greifvorrichtung am Turm hochgefahren und angebracht. Um das Blatt ausrichten und die Bolzen in das Lager einführen zu können, ist ein hydraulischer Scherenhub vorgesehen. Das System ist vor allem für die Errichtung neuer Anlagen vorgesehen.

Vorteil dieser Lösung ist, dass sie unempfindlich gegen Witterungseinflüsse ist. Die Montage soll theoretisch bei bis zu 50m/s Windgeschwindigkeit stattfinden können. Außerdem wird eine Hublast von bis zu 500t angegeben. Gegen dieses System für den Einsatz bei einem zügig zu erfolgenden Blatttausch spricht der Umfang den die Turmkonstruktion bedeutet. Des weiteren wird der Gittermastturm am Fundament der

Anlage befestigt, was bei dem Einsatz an bestehenden Anlagen eine Nachrüstung erforderlich macht.

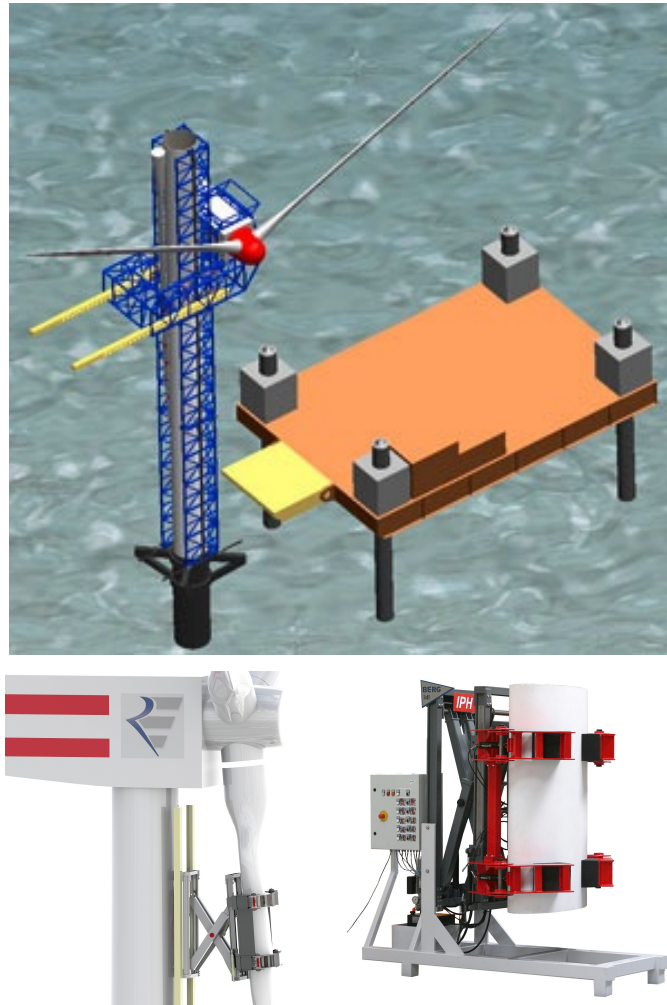


Abbildung 3.10.: Berg-Idl Wind Lift Tower [16] in Zusammenarbeit mit dem Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) [25]

3.5. Patente

Die oben namentlich vorgestellten Vorrichtungen und Geräte sind alle zumindest zu Patenten angemeldet worden.

Die Patentrecherche ergab ein relevantes, nicht weiter realisiertes Patent von General Electric (siehe Abb.3.11a, [5]). Dabei wird das Blatt mit einem Gurtsystem umfasst, und über temporär installierte Seilwinden zu Boden gelassen oder angehoben. Dieses Verfahren ist vor allem dadurch attraktiv, da es nur einen kleinen Kran zur Führung der Blattspitze benötigt und sämtliche schwere Technik (Kran und Seilwinden) am Boden untergebracht ist. Das Patent spezifiziert im ersten Patentanspruch die Montage der Umlenkrollen an den Blättern die dem zu montierenden benachbart sind. In weiteren Ansprüchen wird die Befestigung der Umlenkrollen dahingehend eingegrenzt, dass sie an den Pitchlagern der Blätter erfolgen soll. Damit ist das generelle Prinzip dieser Lösung nicht ausgeschlossen. Ein Patent der Firma Strabag Wind GmbH sieht den Transport eines Rotorblattes am Turm vor. Im Hauptanspruch wird festgelegt, dass das Blatt mittels Saugnäpfen an der Vorrichtung gehalten wird. Der Hub erfolgt an einem Turmlift.

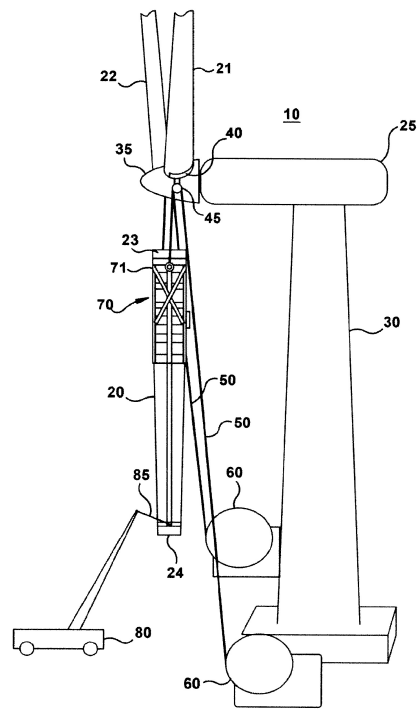


FIG. 1

(a) Prinzipskizze zum GE-Patent zur Blatthandhabung [5]

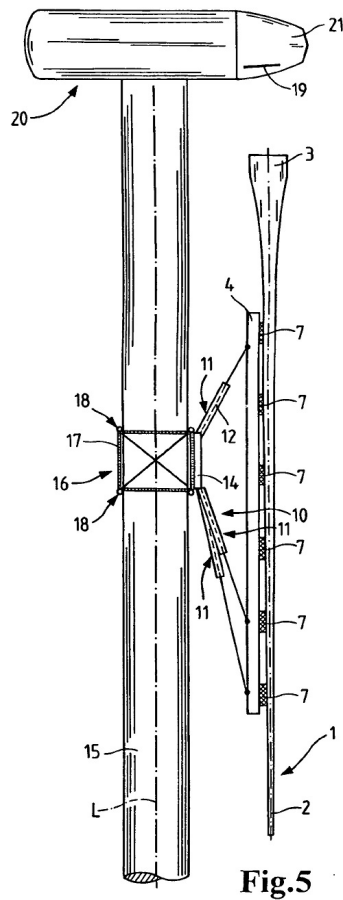


Fig.5

(b) Prinzipskizze zum Strabag-Patent [2]

Abbildung 3.11.: Skizzen zu Patenten für die Einzelblattmontage

3.6. Zusammenfassung

Die Erforschung des Stands der Technik hat ergeben, dass eine Vielzahl von Lösungen zum Thema des Lastenhubs an Windenergieanlagen bereits existiert oder sich in Entwicklung befindet.

Nicht alle Verfahren dienen der Montage einzelner Rotorblätter. Extern angebrachte Hilfskräne wie Gamesa Flexifit und Vestas' Tower Crane dienen dazu schwere Maschinenkomponenten zu heben. Die Maschinen selbst oder ihre Montageverfahren können aber die Lösungsfindung beeinflussen.

Mit Ausnahme nicht umgesetzter Patente setzen alle aktuellen Verfahren den Einsatz großer Krane voraus. Andere, wie Aeolus II, und Vorschläge wie der Wind Lift Tower setzen auf Gerüststrukturen die entweder fest montiert sind oder einen ähnlichen Teileumfang haben wie größere Mobilkrane.

In Tabelle 3.1 sind Vor- und Nachteile der Verfahren dieses Kapitels aufgeführt.

Tabelle 3.1.: Zusammenfassung des Standes der Technik verschiedener Montageverfahren

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Sternmontage	- kompletter Rotor wird montiert	- sehr große zu hebende Last - windanfällig - Großkran erforderlich
Einzelblattmontage		
C-Haken	- einfache Konstruktion - Blatt seitlich entnehmbar	- Blatt nur in geringem Maße ausrichtbar - nicht unfallfrei, da seitlich offen - Großkran erforderlich
Blade Dragon	- Blatt wird fest umgriffen - Blatt rotierbar	- aufwendige Maschine - schwer - Großkran erforderlich
Blattraversen	- Blatt wird festgehalten - Blatt in geringem Umfang drehbar	- Großkran erforderlich - Einige sind sehr komplex
BBBM	- Führung des Blattes am Kran	- Großkran erforderlich - spezieller oder modifizierter Kranausleger erforderlich
Hilfskräne		
Gamesa Flexifit	- stabile Plattform - transportierbar	- Montage erfordert Kran - Auslegerreichweite gering - Rotorblätter nicht hebbar
Vestas Tower Crane	- stabile Plattform - Montage mit Bordkran möglich - auf wenigen LKW transportierbar	- Auslegerreichweite gering - Rotorblätter nicht hebbar
Andere Systeme		
Aeolus II	- Schwere, große Lasten montierbar - Blattmontage in Bodennähe denkbar	- fest installiertes Schienensystem würde Nachrüstung an bestehenden Anlagen erfordern
Wind Lift Tower	- stabile Plattform - schwere Lasten montierbar - Wetterunempfindlich	- Komplette Einrüstung des Turms - große Menge an Teilen
Eigene Lösung	- Kein Großkran erforderlich - kompakt transportierbar	- Eigene Montage erforderlich

4. Lösungsfindung

Bisher wurde der Stand der Technik anhand existierender oder in Form von Patenten vorliegender Konstruktionen und Verfahren aufgezeigt. In diesem Kapitel wird der konstruktive Teil der Aufgabenstellung begonnen. Als erstes wird die Aufgabe abstrahiert. Über eine Betrachtung des zu erwartenden Betriebsablaufs wird eine Funktionsstruktur des Verfahrens erstellt. Aus dieser Struktur folgen wesentliche Teilfunktionen für die Lösungen gefunden werden müssen. Aus den gesammelten Lösungen entstehen durch Variantenkombination mehrere Gesamtlösungen. Sie werden in einer Gegenüberstellung bewertet. Die beste Variante wird im folgenden Kapitel weiter ausgestaltet (siehe Kapitel 5).

4.1. Funktionsstruktur

Zunächst wird für die Lösungsfindung eine Systemgrenze festgelegt. Diese soll alle Teile des Tauschverfahrens umfassen. Sie schließt das zu demontierende Rotorblatt mit ein, solange es einen Einfluss auf das Verfahren hat. Der Transport des Blattes am Boden wird hier nicht betrachtet. Die Schritte *Montage* und *Demontage* werden ebenfalls ausgenommen. Die Aufteilung in transportier- und montierbare Teile wird bei der Ausgestaltung der ausgewählten Lösung bearbeitet. Das Befestigungs- und Löseverfahren des Blattes, d.h. das Anziehen und Lösen der Bolzenverbindungen mit der Nabe, werden als nicht veränderbare Zustände betrachtet. Damit gehen sie nur in Form einer Information - sind die Verbindungen gelöst oder angezogen - in die Lösungsfindung ein.



Abbildung 4.1.: Funktionsstruktur Ebene 0

Als erste und größte Ebene einer Funktionsstruktur kann das Verfahren als „Black Box“ angesehen werden. Üblicherweise werden drei Ressourcen unterschieden: *Stoff*, *Energie* und *Signal/Information*.

Um die Funktionsstruktur nach Abbildung 4.1 mit einer ersten Aufteilungsebene zu füllen, wird der zu erwartende Betriebsablauf der Tauschvorrichtung skizziert. Der gefundene Ablauf benennt die einzelnen Schritte, die während einer Blatt(de)montage durchlaufen werden. Dabei treten einige Schritte mehrmals auf, dauern an, oder werden rückwärts durchgeführt.

Der Betriebsablauf wird um Stoff- und Energieflüsse zu einer Funktionsstruktur erweitert, zu sehen in Abbildung 4.2. Der einzige Stofffluss ist in diesem Falle das zu (de-)montierende Rotorblatt. Ein Signalfluss wurde hier nicht dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass alle Schritte durch Sensoren und Beobachtung überwacht werden.

In Abbildung 4.2 sind Montage und Demontage dargestellt, der Blattmontagevorgang rechts und der Demontageablauf links.

Die eigentlichen Betriebsvorgänge sind innerhalb einer Systemgrenze, der „Black Box“ in Abbildung 4.1 angeordnet. Die Vorgänge des Auf- und Abbaus des Verfahrens werden der Vollständigkeit halber in der Ablauf- und Funktionsstruktur dargestellt. Für die weitere Lösungsfindung werden sie nicht weiter betrachtet, da sie aus der Gestaltung des endgültigen Verfahrens resultieren.

Der Energiefluss versorgt alle Teilfunktionen mit Energie. Vorzugsweise benötigt die Funktion „Blatt halten“ keine Energie. Im Falle eines (teilweisen) Systemstillstandes soll das Rotorblatt sicher hängen und nicht abstürzen können.

Nachdem das Blatt in sein Pitchlager eingefädelt wurde müssen die Bolzenverbindungen verschraubt werden. Dies wird für diese Arbeit als gewöhnlicher Vorgang des Anlagenbetriebs betrachtet. Damit stellt dies nur eine Unterbrechung des Verfahrensablaufes dar für die keine Lösung im Rahmen dieser Arbeit gefunden werden muss.

Aus Abbildung 4.2 können wesentliche Teilfunktionen abgelesen werden.

- Laden und Entladen des Blattes am Boden, bzw. in Bodennähe.
- Greifen und Loslassen des Blattes am Turm.
- Halten des Blattes.
- Heben und Senken eines Blattes von oder auf Nabenhöhe.
- Führen des Blattes, bzw. der Haltevorrichtung, während einer Huboperation.
- Drehen des Blattes aus einer horizontalen in eine senkrechte Position.
- Ein- und Ausfädeln eines Blattes.

Außer den oben aufgelisteten Teilfunktionen ist zu beachten, dass der Betrieb auch ohne Rotorblatt erfolgen muss. Durch die dabei fehlende Masse kann sich eine Hebevorrichtung anders verhalten als beim Hub mit Blatt.

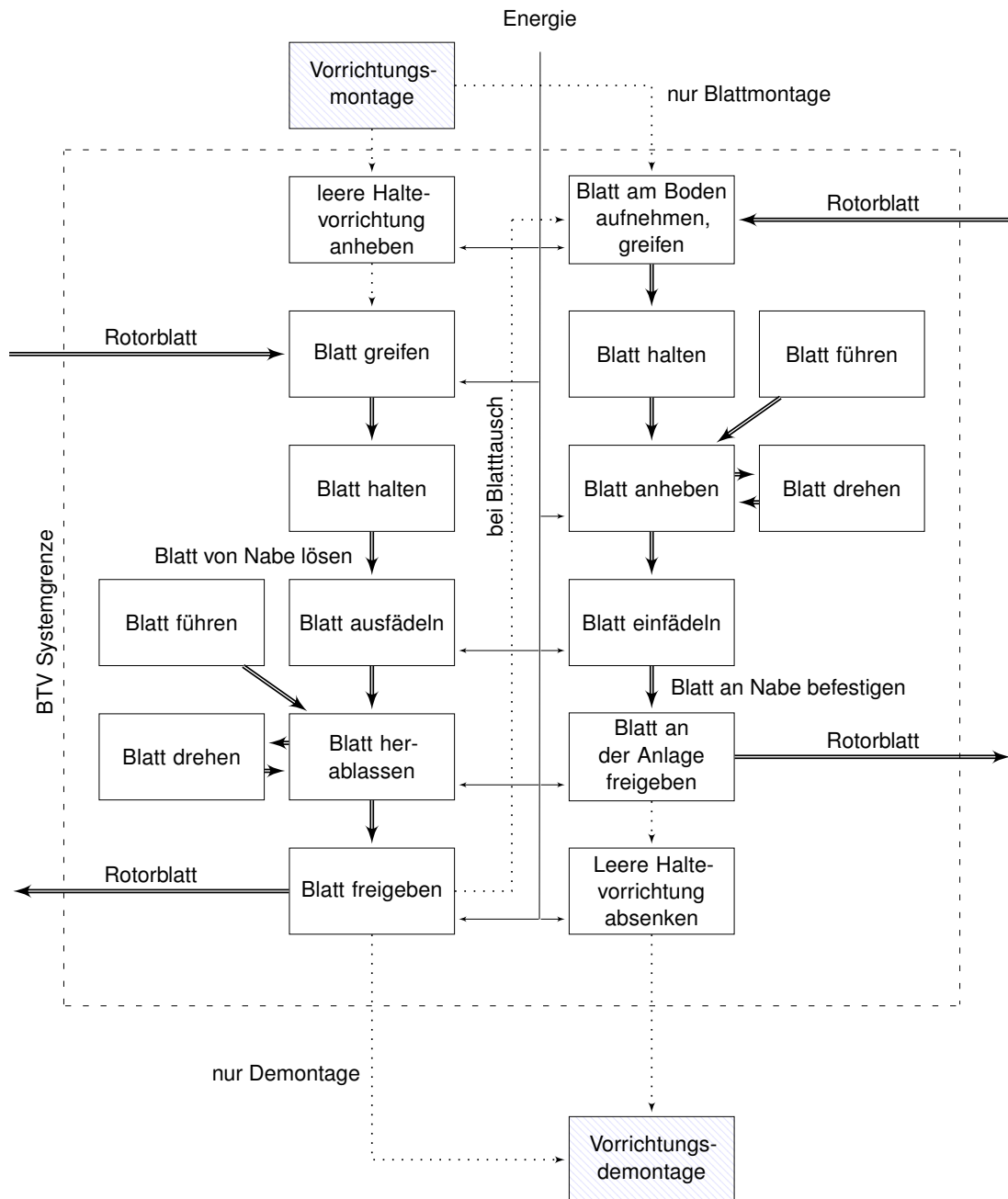


Abbildung 4.2.: Ablauf- und Funktionsstruktur einer Blatttauschvorrichtung

4.2. Lösungssammlung für Teilfunktionen

4.2.1. Einleitung

In diesem Abschnitt werden für die vorher ermittelten Teilfunktionen Lösungen gesammelt. Des Umfangs wegen sind nicht alle denkbaren Varianten dargestellt. Ebenso fallen exotischere Varianten aus¹. Die Beschreibung der Lösungsansätze wird dabei möglichst nicht wertend durchgeführt. Eine Wertung findet erst bei der Kombination von Teilen zu Gesamtlösungen statt. Bei der Darstellung wird auch auf physikalische Prinzipien verzichtet, d.h. im Falle einer Linearführung wird die Funktion der Führung berücksichtigt, aber nicht, ob diese über Zahnstangen, Spindeln, Hydraulikzylinder oder Magnetfelder erzeugt wird.

Die den Skizzen zugehörigen Texte beschreiben meist die Demontage eines Blattes von der Anlage. Sofern keine wesentlichen Unterschiede außer einem rückwärts ablaufenden Verfahren erkennbar sind, wird auf die Beschreibung beider Vorgänge verzichtet.

4.2.2. Blatt heben und senken

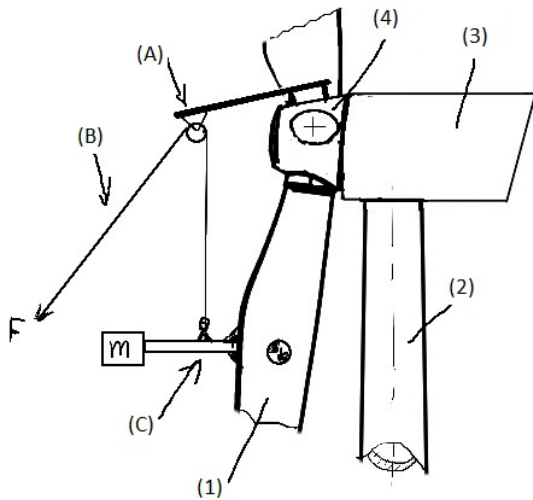
Es sind viele Arten denkbar eine Masse an einer WEA zu heben. Viele sind Varianten von Seilzugsystemen (Abbildung 4.3). Dabei ist es möglich die benötigten Seilwinden am Boden, an Anlagenteilen oder an der Hebevorrichtung selbst zu befestigen. Die Nabe ist ein Gussteil und hat zwischen den Lageraufnahmen Anschraubpunkte, die für die Sternmontage genutzt werden (siehe Abbildungen 4.18 und 3.1 rechts).

In den Skizzen zeigen Seilzüge immer nach vorne von der Anlage weg. Dies muss nicht so sein, am Boden befindliche Seilwinden u. Ä. könnten auch neben dem Turm stehen.

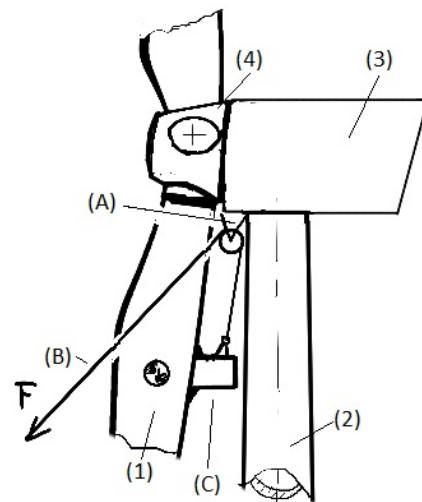
Die nächste Skizze (Abb. 4.3d) beinhaltet ein System aus einem Träger mit Umlenrollen über den ein Seil durch die vordere Öffnung der Nabenverkleidung geführt wird. Am Blatt wird einer oder mehrere Bolzen ausgetauscht. Es werden speziell gestaltete Dehnbolzen verwendet, an denen ein Seil befestigt werden kann. Das nach draußen geführte Seil wird vom Boden aus manipuliert. Nachdem das Seil gesichert ist, wird die Verbindung des Rotorblattes mit dem Pitchlager gelöst. Das Seil folgt beim Herablassen dem Bolzen durch die entsprechende Bohrung im Pitchlager. Bei der Montage eines Blattes wird diese als Zentrierhilfe benutzt.

Abbildungen 4.3e und 4.3f zeigen alternativen zu Seilzugsystemen. Die erste nutzt das gleiche Prinzip wie sich selbst errichtende Baukräne, ähnlich dem Wind Lift Tower.

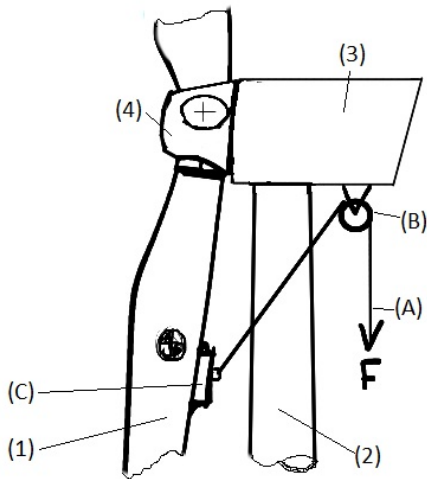
¹Luftschiffe waren ihrer Zeit leider etwas voraus, siehe Cargo Lifter



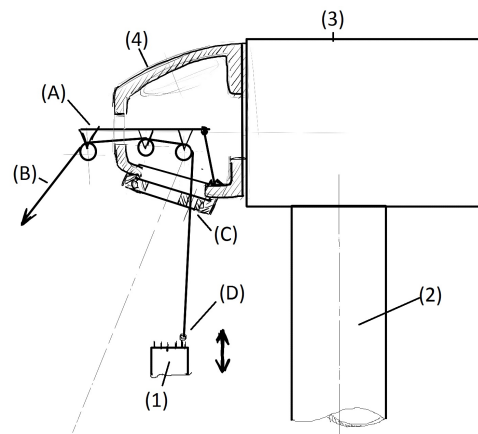
(a) Umlenkrolle(n) vor Rotor mit Seilwinde am Boden



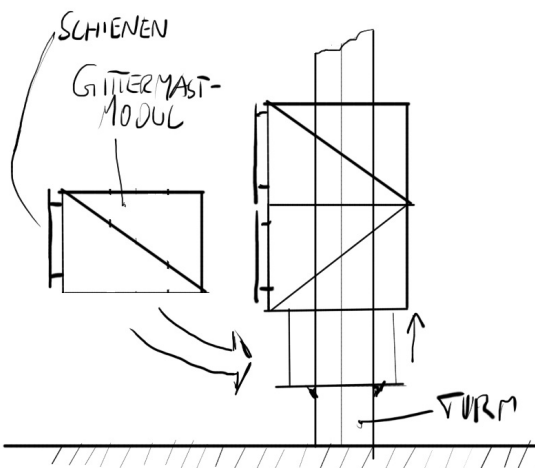
(b) Umlenkrolle(n) zwischen Rotor und Turm mit Seilwinde am Boden



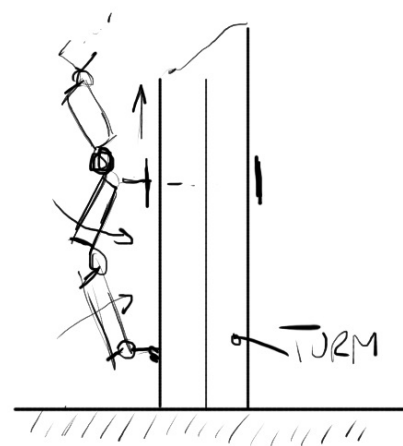
(c) Umlenkrolle hinter, Hebevorrichtung vor Turm



(d) Seil über Umlenkrollen durch Nabeninneres geführt, heben an Dehnbolzen



(e) Sich selbst errichtender Gittermasteturm mit Schienen



(f) Schienen als faltbares Scherensystem

Abbildung 4.3.: Skizzen für Teilfunktion Heben und Senken

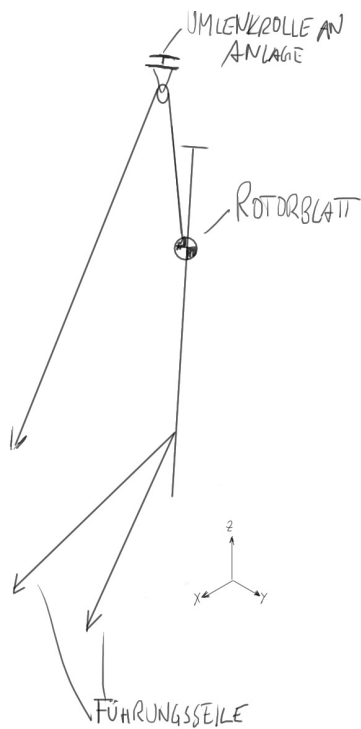
Dadurch wäre ein stabiles Gerüst gegeben um unhandliche Lasten an der Anlage zu heben. Die zweite ist ein Faltbares Schienensystem. Das erste Element wird in Bodennähe am Turm befestigt. jedes zweite Gelenk umfasst den Turm und wird von ihm geführt. Dieses System benötigt einen Seilzug, wie z.B. den Bordkran für die Errichtung. Danach steht das System ohne Hilfe.

Beide Teillösungen brauchen - zumindest offshore - ein Fundament auf dem sie aufgebaut werden können. Dies mag mit Nachrüstungen der entsprechenden Anlagen verbunden sein.

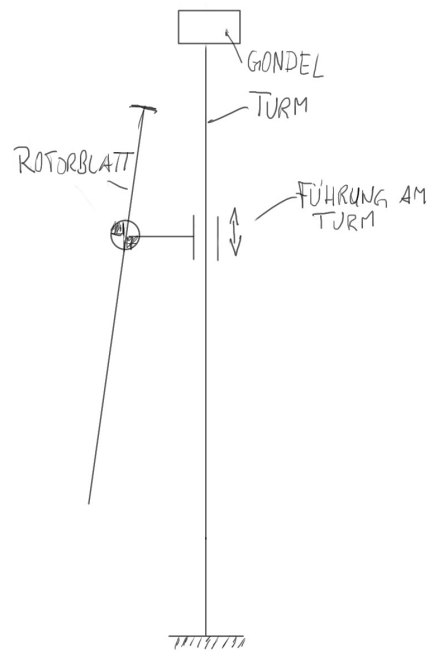
4.2.3. Blatt führen

Die Funktion Blatt führen soll gewährleisten, dass das Rotorblatt oder Teile der Hebe- und Senkvorrichtung kontrolliert werden können und nicht mit anderen Anlagenteilen kollidieren.

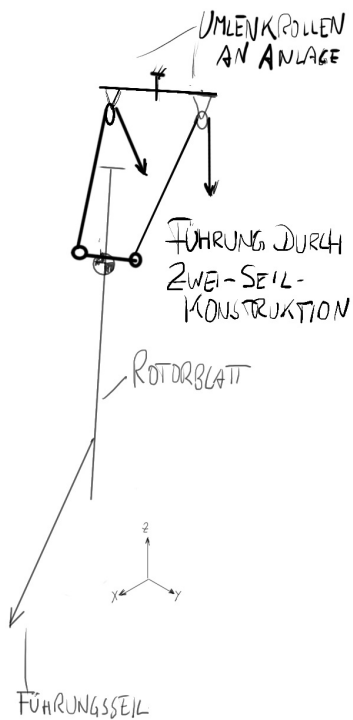
Die sicherste Führung ist in Abbildung 4.4b zu sehen. Bei dieser Variante würde ein an der Turmoberfläche laufender Wagen auch um den Turm herumgreifen um ein Abheben zu verhindern. Darunter ist eine turmgeführte Variante skizziert, die sich den Schwerpunkt der Vorrichtung zunutze macht um den Kontakt mit dem Turm zu bewahren. Die anderen sind Variationen von Seilführungen.



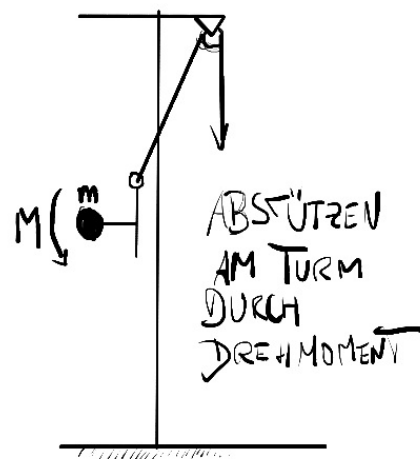
(a) Führungsseile



(b) Führung am Turm



(c) Führungsseile am Turm



(d) Abstützen am Turm durch Massendrehmoment

Abbildung 4.4.: Skizzen für Teilfunktion Führen

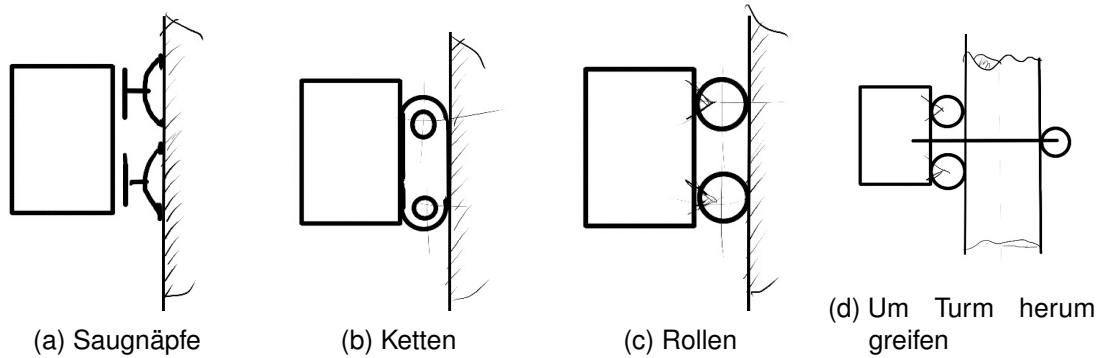


Abbildung 4.5.: Skizzen für Teilfunktion Führen bei Abstützung am Turm

4.2.4. Blatt halten

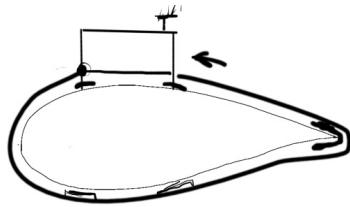
Ein Rotorblatt kann auf verschiedene Arten gehalten werden. Vorzugsweise wird dies durch Methoden bewerkstelligt, die keine Veränderungen am Blatt erfordern. Dazu gehören angeschraubte Flansche oder auch Klebeverbindungen. Beide ermöglichen eine sichere Verbindung von Haltevorrichtung und Blatt, würden aber im ersten Fall seine Struktur beeinträchtigen und im zweiten Fall bei der Montage eine Reinigung erfordern.

Daher sind Verbindungen zu bevorzugen, die durch Kraftschluss halten können oder durch die Gestaltung der Lagerung dafür sorgen, dass das Blatt im gesamten Vorgang auf Lagerpunkten aufliegt.

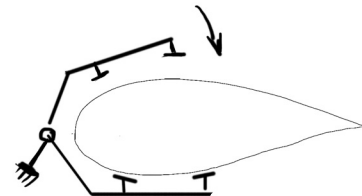
Abbildung 4.6a sieht ein System aus Spanngurten vor in die das Blatt bereits beim Heraufziehen der Vorrichtung an der Anlage eingefädelt werden muss. Als Alternative können die Spanngurte offen bleiben, müssen dann aber manuell um das Blatt geschlungen werden. In der Sollposition werden die Gurte angezogen. An geeigneten Stellen des Gurtes können Blöcke angebracht sein mit denen eine Druckkraft auf die Blattgurte erzeugt wird, wodurch das Blatt gehalten wird.

In Abbildungen 4.6b bis 4.6e sind verschiedene mechanische Greifer skizziert. Je nach Montagerichtung werden die Greifarme von einer oder zwei Seiten an das Blatt angebracht. Unterschiedliche Bewegungen sind denkbar, wobei Greifer mit rotierenden Armen den meisten Freigang möglich machen sollten.

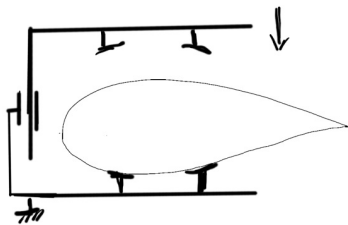
Als letzte Möglichkeit wird das Anheben an einem oder mehreren Dehnbolzen dargestellt (siehe auch Abb. 4.3d). Die Befestigung eines Seils an speziellen Bolzen erfolgt dabei wenn das Blatt am Boden liegt bzw. bevor die restlichen Bolzenverbindungen des montierten Blattes gelöst werden. Dazu müssen entsprechend Dehnbolzen ersetzt werden.



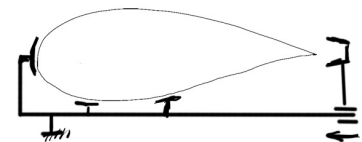
(a) Spanngurte



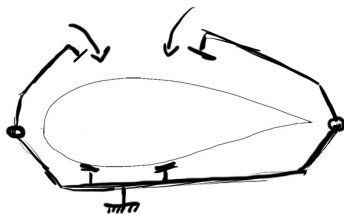
(b) Greifen



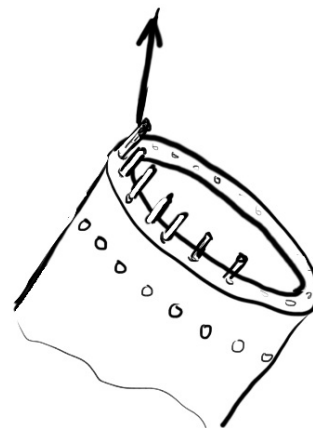
(c) Klemmen von Druck-/ Saugseite



(d) Klemmen zwischen Vorder- und Endkante



(e) Greifen über Vorder- und Endkante



(f) Halten an modifiziertem Dehnbolzen

Abbildung 4.6.: Skizzen für Teilfunktion Halten

4.2.5. Blatt am Boden aufnehmen oder entnehmen

Für die notwendigen Operationen am Boden oder in Bodennähe gibt es mehrere Möglichkeiten. Wird das Blatt mit einem Hilfskran geführt und in die Waagerechte gedreht, so kann es (bei entsprechender Positionierung der Plattform im Offshoreeinsatz) direkt vor dem Turm abgelegt werden. Soll etwas Abstand zum Turm entstehen kann durch den Einsatz zusätzlicher Zugseile eine entsprechende Bewegung vom Turm weg durchgeführt werden.

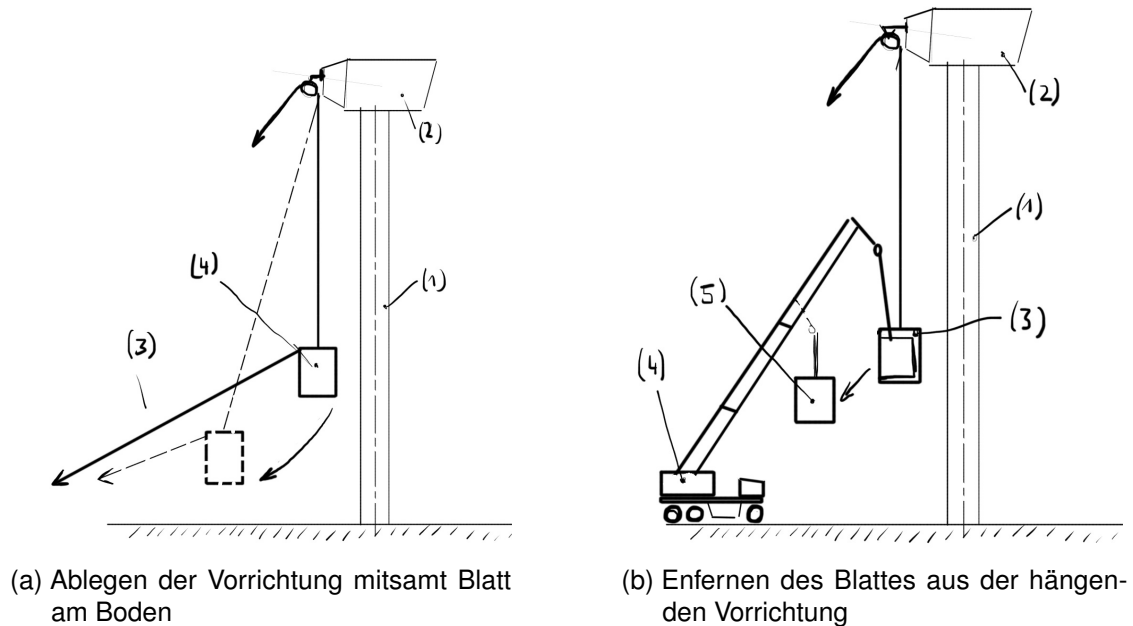


Abbildung 4.7.: Skizzen für die Teilfunktion (Ent-)Laden am Boden

Beim Einsatz turmgeführter Hubvorrichtungen ist es denkbar das Blatt entweder am Turm aus der Haltevorrichtung zu entnehmen, etwa mit zusätzlichen Kränen, oder die Vorrichtung vom Turm wegzuziehen und in einiger Entfernung auf dem Boden abzusetzen.

In den üblicherweise für das M5000-116-Rotorblatt verwendeten Transportgestellen liegt es mit einem Pitchwinkel von -47° . Es ist daher sinnvoll das Blatt so aus der Vorrichtung entnehmen zu können, dass es ohne weitere Drehung in die üblichen Transportgestelle gelegt werden kann.

4.2.6. Blatt am Turm greifen oder freigeben

Um das an der Anlage hängende Rotorblatt zu greifen, muss das Greif- oder Halteverfahren so angehoben werden können, dass es nicht mit ihm kollidiert.

Dies kann durch bereits skizzierte Teillösungen erreicht werden. Turmgeführte Verfahren werden zwischen Blatt und Turm bewegt. Durch den Achs- und Konuswinkel des Blattes wird eine Kollision der Vorrichtung mit dem Blatt so lange vermieden, bis die Endposition erreicht ist. Verfahren deren Haltevorrichtung nicht zwischen Turm und Blatt bewegt wird, sollten zum Heranführen an das Blatt, bzw. zum Entfernen vom Blatt nach der Montage, durch entsprechende Gestaltung der Aufhängung, oder auch den Einsatz zusätzlicher Leinen, vom Blatt ferngehalten werden.

4.2.7. Blatt drehen

Wegen seiner 6-Uhr-Stellung an der Anlage, ist es erforderlich das Blatt bei der (De-)Montage zu drehen. Am Boden befindet es sich in einer liegenden Position befinden. Abbildung 4.8 zeigt verschiedene Möglichkeiten ein Rotorblatt zu drehen.

Der Einsatz eines Drehtellers erfordert die meiste Mechanik. Die Drehung kann durch Getriebe, Zahnstangen oder Hydraulikzylinder erfolgen.

Die zweite skizzierte Möglichkeit ist der Einsatz einer motorisierten Traverse, deren Neigung veränderbar ist, ähnlich der Blatttraverse von Ematec (Abbildung 3.4).

Die technisch einfachste Lösung ist das Blatt an seinem Schwerpunkt an einem Seilzug zu befestigen. Ein zweiter Anschlagpunkt wird an einer der tipseitigen Transportverstärkungen (Abb. 2.3) angebracht. Hier kann ein Kran die Blattspitze führen. Durch die entsprechende Kombination der Bewegungen von Seilzug und Kran kann das Blatt in die Waagerechte gedreht werden.

Durch entsprechend gestaltete Geometrie, lässt sich eine Vorrichtung konstruieren die es ermöglicht das Blatt unter Verwendung einfacher Ketten- oder Seilzüge um seinen Schwerpunkt zu drehen.

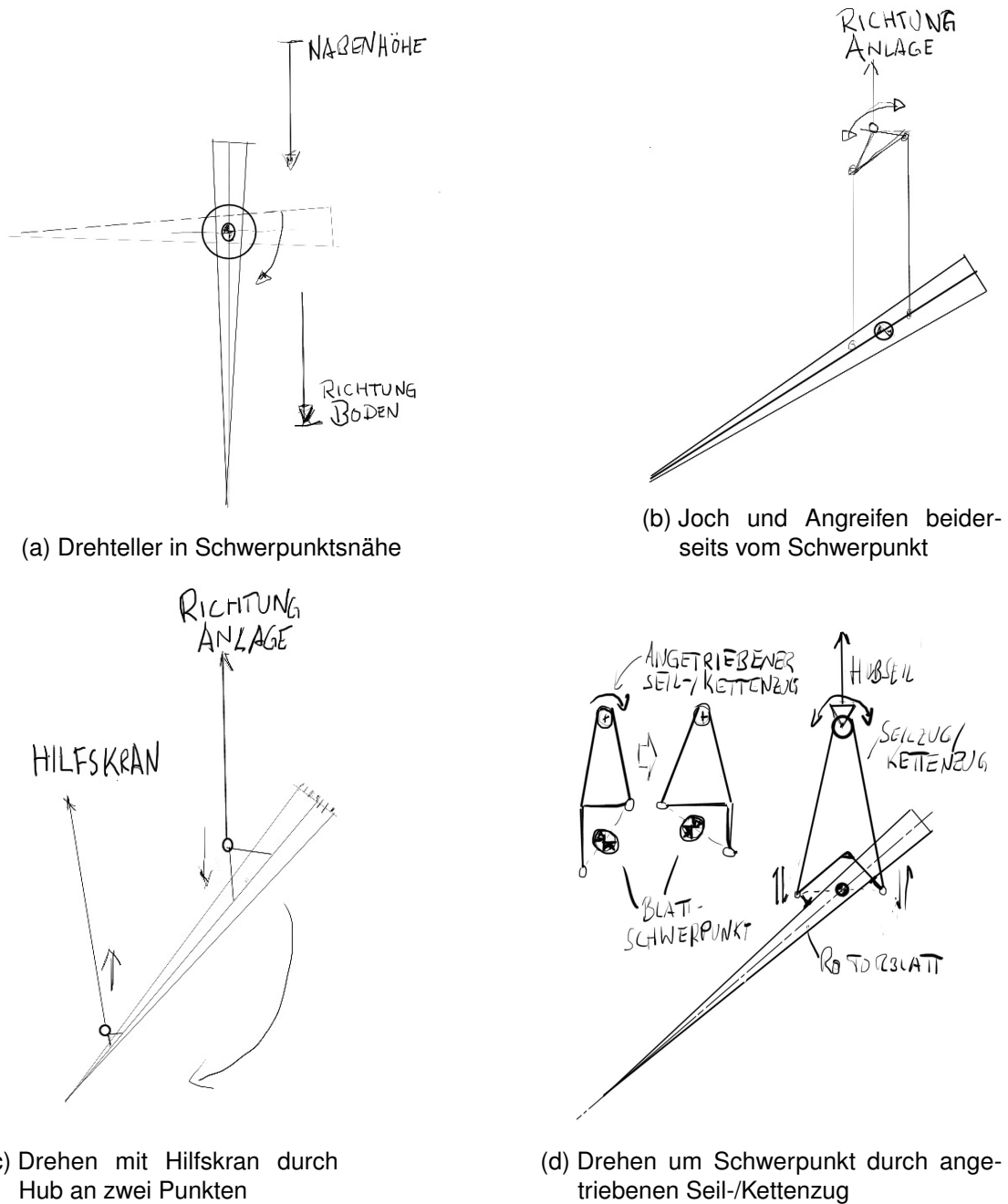


Abbildung 4.8.: Skizzen für Teilfunktion Drehen

4.2.8. Blatt ein- und ausfädeln

An der Anlage müssen die Blattbolzen durch die entsprechenden Bohrungen im Pitchlager gefädelt werden. Abbildung 4.9 zeigt zwei Ansätze dazu. Das eine Prinzip setzt eine an einer Haltevorrichtung angebrachte Linearführung mit entsprechend eingestelltem Winkel vor. Die andere Möglichkeit ist die Aufteilung der Fädelbewegung in zwei Komponenten die getrennt voneinander durchgeführt werden. Die eine Richtung wird dabei durch die Hubfunktion des Verfahrens bewerkstelligt. Die zweite Komponente

wird durch eine zusätzliche Mechanik realisiert. Hierbei sind mehrere verschiedene Arten der Linearbewegung denkbar. Über eine Spindel wäre eine rein mechanische Lösung gebaut. Alternativen dazu sind Hydraulikzylinder.

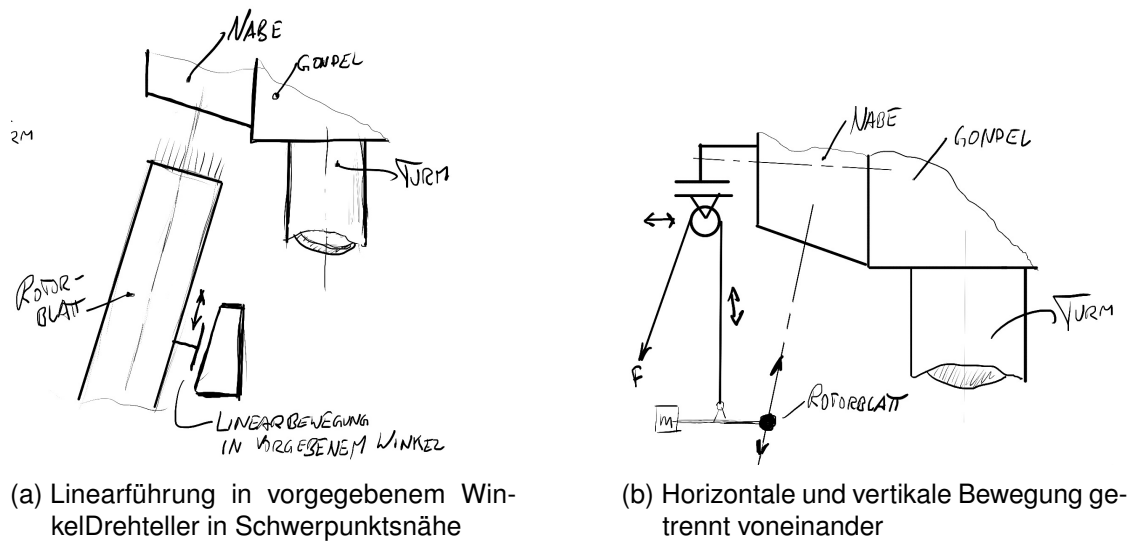


Abbildung 4.9.: Skizzen für Teilfunktion Ein-/Ausfädeln

Eine andere, oben nicht dargestellte Lösung ist, ein oder mehrere Seile - welches auch für die Huboperation verwendet werden könnte - durch eine oder mehrere Bohrungen des Pitchlagers zu führen. Die Blattwurzel mit den Bolzen muss damit dem oder den Seilen folgen. Dadurch fädelt sich das Blatt selbst ein. Durch die Verwendung passender Zentrierbolzen ist das Ansetzen des Blattes am Lager hinreichend gewährleistet.

Bei Lösungen, die das Einfädeln mit nur einer Bewegung bewerkstelligen ist dazu prinzipiell zu überlegen, ob der Achs- + Konuswinkel fest, fest einstellbar, oder variabel sein soll. Die sinnvollste Mischung scheint hierbei die fest einstellbare Variante zu sein. Vor Inbetriebnahme würde der Winkel eingestellt werden der am Einsatzort vorliegt.

4.3. Suche von Gesamtlösungen

Nach der Sammlung von verschiedenen Lösungsvarianten für die einzelnen Teilfunktionen müssen mehrere Gesamtlösungen gefunden werden. Das dazu benutzte Werkzeug ist der so genannte Morphologische Kasten. Darin werden alle Einzellösungen eingetragen. Jede Zeile enthält die Lösungen für eine Funktion. Durch Kombination der Einzellösungen entstehen verschiedene Gesamtlösungen. Diese werden häufig durch Pfade die durch den Morphologischen Kasten führen dargestellt.

Dabei wurde festgestellt, dass bei einigen Teillösungen Abhängigkeiten zu anderen bestehen. So können die gefundenen Hubprinzipien nicht ohne eine Abstützung am

Turm oder den Einsatz Gegengewichten funktionieren ohne, dass das Blatt sich in unerwünschte Richtungen dreht.

Der Morphologische Kasten, wie er sich für diese Arbeit darstellt ist in Tabelle 4.1 zu sehen. Darin sind die Pfade mit denen die Einzellösungen zu den in Abschnitt 4.4 vorgestellten Gesamtlösungen kombiniert wurden dargestellt. Lösung A (Abschnitt 4.4.1) ist rot, Lösung B (Abschnitt 4.4.2) ist blau, und Lösung C (Abschnitt 4.4.3) ist grün dargestellt.

Den Morphologischen Kasten kann man mit den vorhin vorgestellten Skizzen füllen. Aufgrund des Platzbedarfs und um eine Wiederholung der Bilder zu vermeiden, werden stattdessen die Abbildungsnummern der jeweiligen Teillösungen in die Tabelle eingetragen.

Tabelle 4.1.: Morphologischer Kasten

Funktion ↓ / Teillösung →	A	B	C	D	E	F	G	H
heben und senken	4.3a	4.3b	4.3c	4.3d	4.3e	4.3f	4.5a	
führen	4.4a	4.4b	4.4c	4.4d	4.5a	4.5b	4.5c	4.5d
halten	4.6a	4.6b	4.6c	4.6d	4.6e	4.6f		
am Boden ablegen / aufnehmen	4.7a	4.7b						
am Turm freigeben / aufnehmen	4.4b	4.4d	4.7a					
drehen	4.8a	4.8b	4.8c	4.8d				
ein- / ausfädeln	4.9a	4.9b	4.3d					

Mit dem Morphologischen Kasten sind die Lösungsvorschläge definiert. Im nächsten Abschnitt werden maßstäbliche Skizzen der Lösungen erstellt und erste Abschätzungen zu Lasten und erforderlichen Antriebswerten gemacht.

4.4. Lösungsvorschläge

4.4.1. Lösung A: Turmgeführter Greifer

Beschreibung der Lösung

Die erste Lösung ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Greifvorrichtung mittels eines Seilsystems am Turm geführt nach oben gezogen wird (Abbildung 4.10). An der Gondel hinter dem Turm befinden sich zwei Umlenkrollen. Die Greifvorrichtung kann sich bei diesem Vorgang in Kontakt mit der Turmoberfläche befinden. Die Vorrichtung verfügt über eine Reihe von Rollen mit denen sie sich am Turm abstützt. Die Führung

geschieht durch die Verwendung zweier Seile zum Heben und durch entsprechend gestaltete Rollenpakete in Kontakt mit der Turmoberfläche. Durch die Anbringung der Seile oberhalb des Schwerpunktes der Vorrichtung wird sie am Turm gehalten.

Seile am unteren Ende der Vorrichtung erlauben es sie vom Turm wegzuheben, bzw. sie kontrolliert an den Turm zu verbringen.

Das Blatt wird mittels einer Greifvorrichtung die entlang der Blattlängsachse beiderseits des Schwerpunktes angreift gehalten. Durch einen angetriebenen Drehteller kann das Blatt in die horizontale Lage gedreht werden. Wegen seiner Schwerpunktlage und des vorhandenen Platzes wird das Blatt so ausgerichtet, dass seine Nase zum Turm zeigt.

Ablauf bei der Demontage eines Blattes. Zuerst wird die Leere Vorrichtung an den Turm gehoben und zwischen Blatt und Anlagenstruktur hochgezogen. In der richtigen Höhe greift die Vorrichtung das Blatt. Das Ausfädeln geschieht mit einer Linearführung. Nach dem Ausfädeln wird die beladene Vorrichtung herabgelassen. Zwischendurch wird der Vorgang angehalten und das Blatt auf die Druckseite gedreht. Danach wird das Absenken fortgesetzt bis eine untere Endposition erreicht ist.

Von dort wird das Blatt mitsamt Vorrichtung vom Turm weggezogen und gleichzeitig zu Boden gelassen. Ein kleiner Kran oder Flurförderfahrzeuge be- und entladen die Vorrichtung am Boden beziehungsweise auf der Jack-Up-Plattform. Alternativ können zwei Krane das Blatt an Wurzel und Transportverstärkung übernehmen und am Boden ablegen. Dazu sind Industriekletterer erforderlich, die die erforderliche Umrüstung vornehmen.

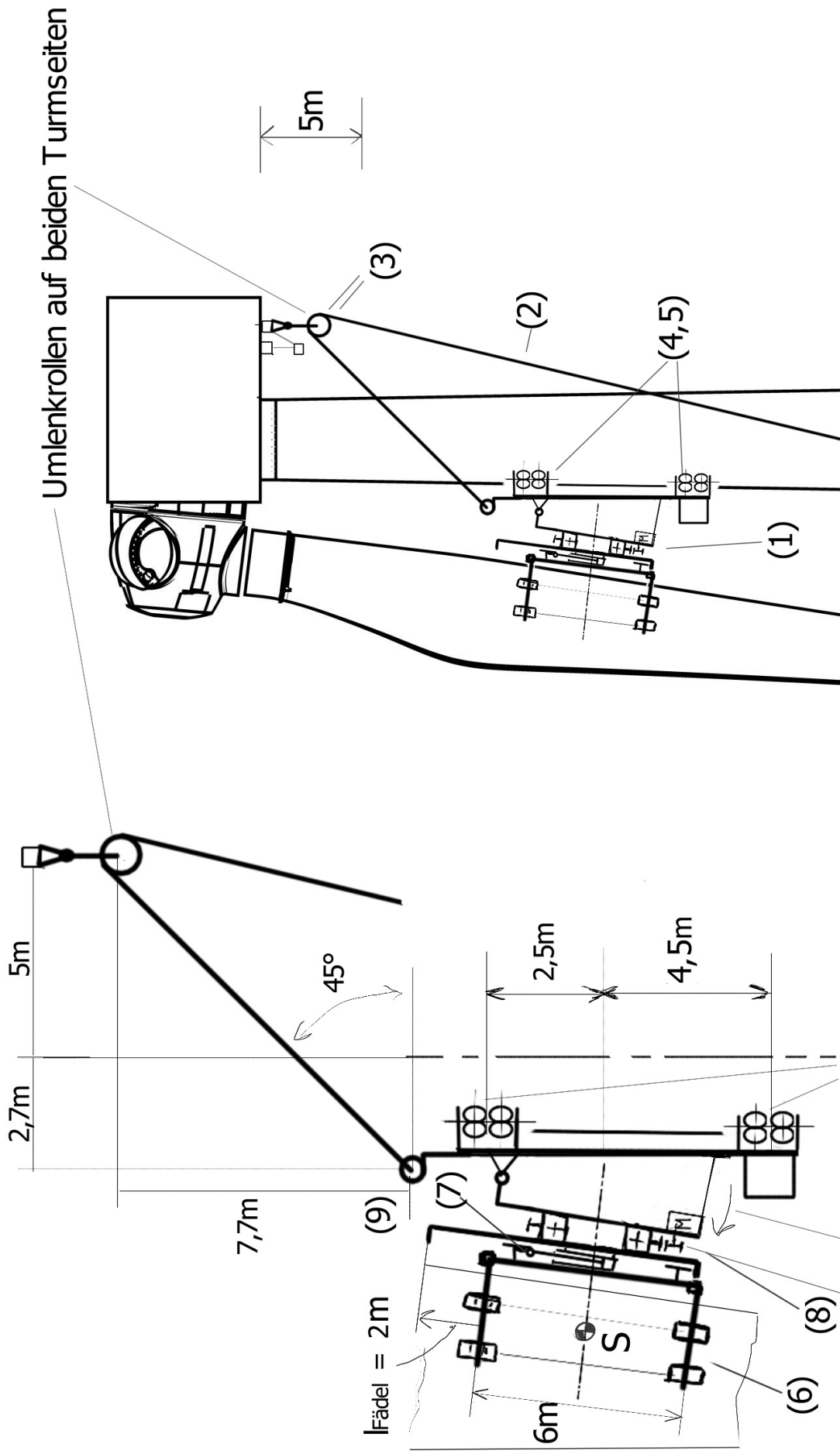


Abbildung 4.10.: Skizze von Gesamtlösung A

Windlasten

In Abbildung 4.12 sind die aerodynamischen Auftriebs- und Widerstandskräfte des Blattes über den Pitchwinkel für eine Anströmgeschwindigkeit von $v_{\text{Wind}} = 1\text{ m/s}$ aufgetragen ([14], die zugehörigen Tabellen sind im Anhang) Abbildung 4.13 zeigt die dazugehörigen Auftriebs- und Widerstandsmomente bezüglich des Blattschwerpunktes. Die Definition des Pitchwinkels ist, von der Wurzel aus blickend, in Abbildung 4.11a zu sehen. Die Auftriebs- (Lift) und Widerstandskräfte (Drag) sind immer senkrecht, bzw. in Windrichtung orientiert.

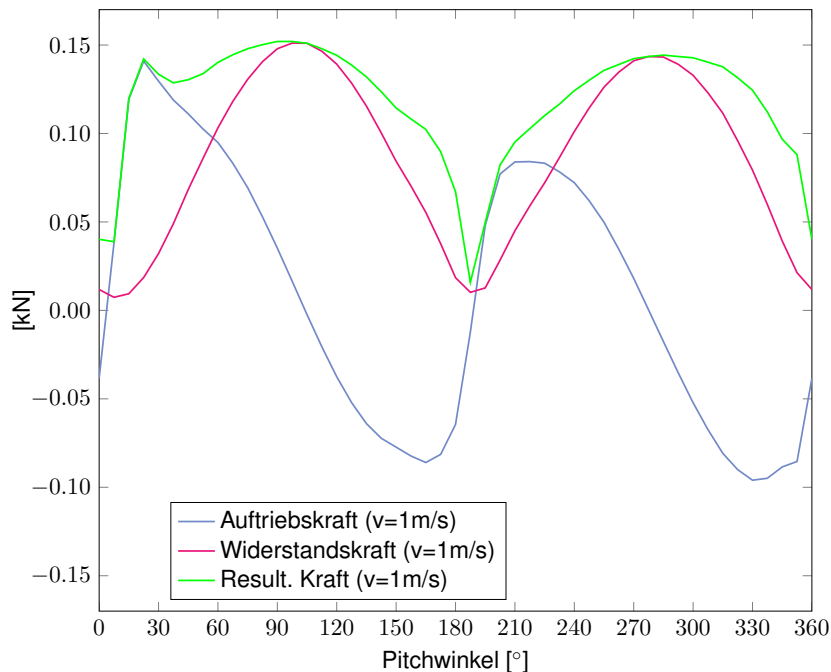
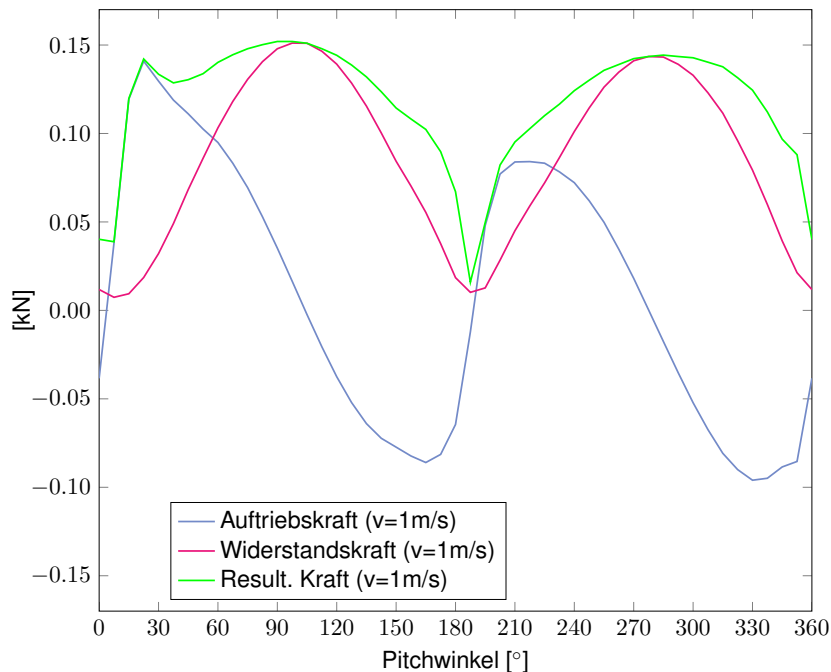
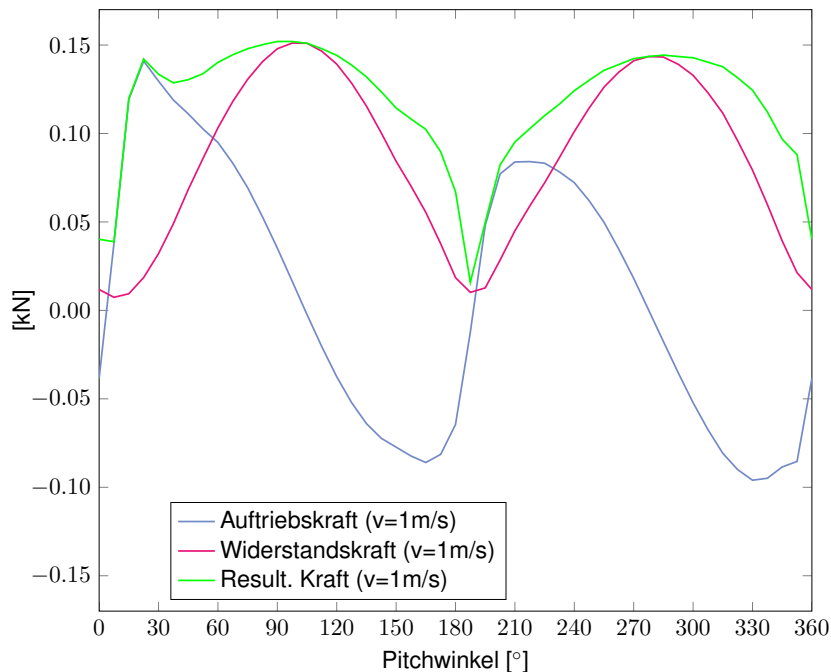
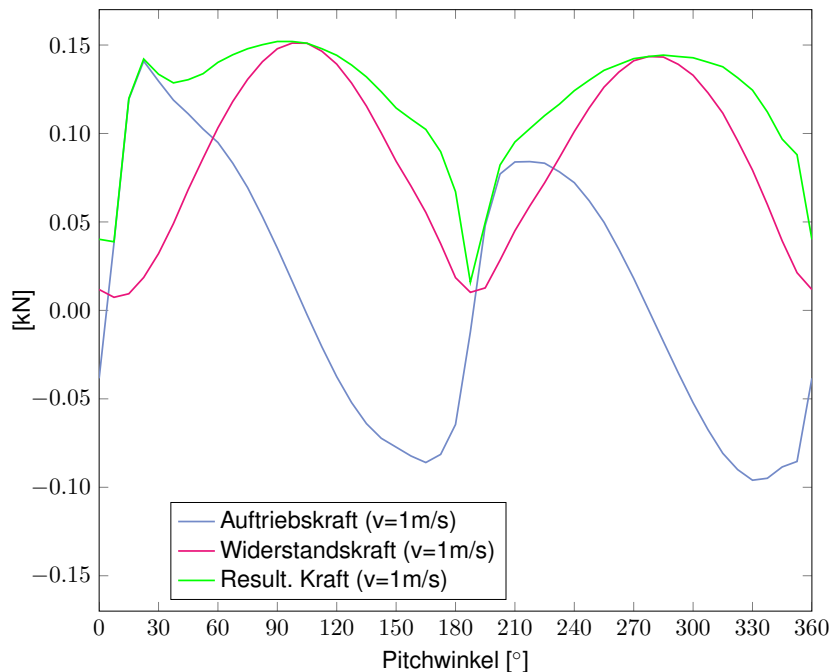
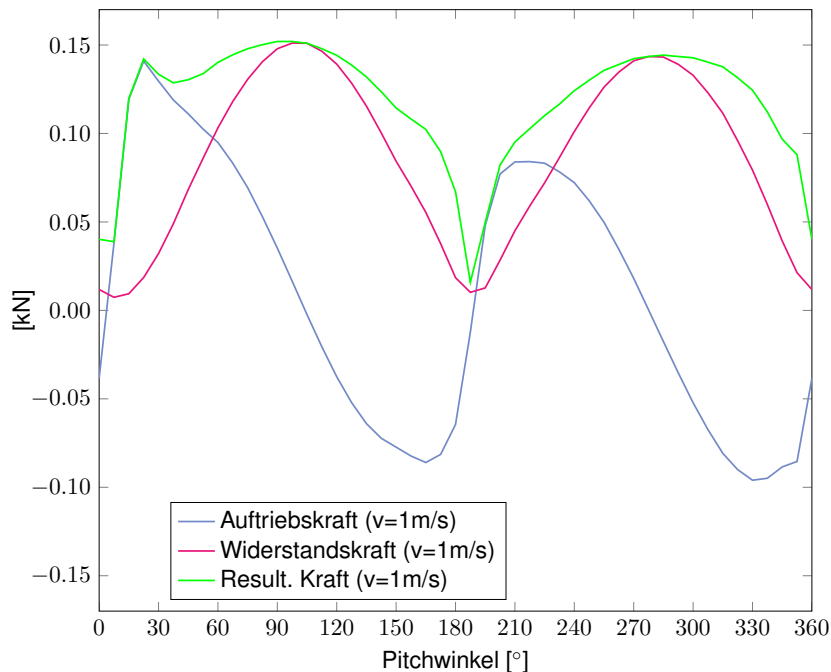
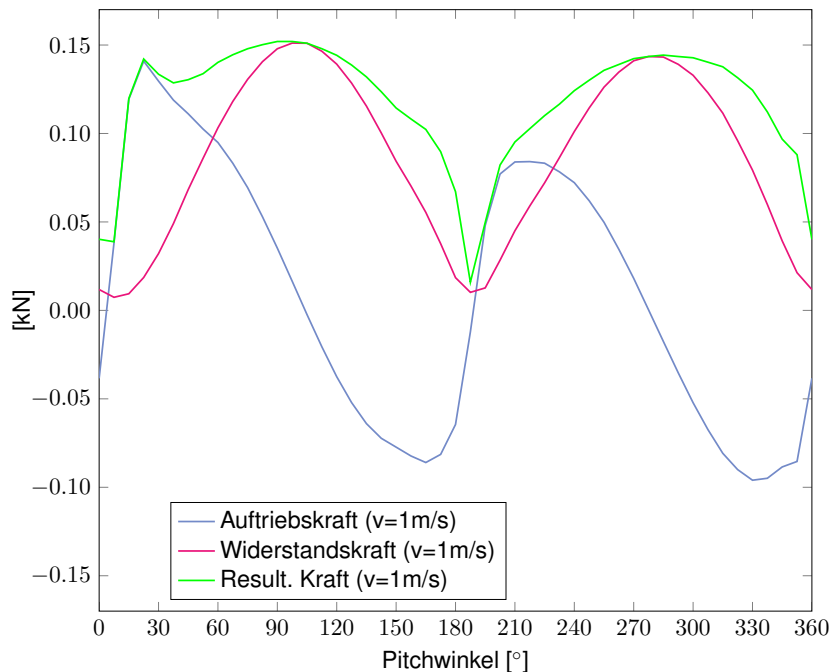
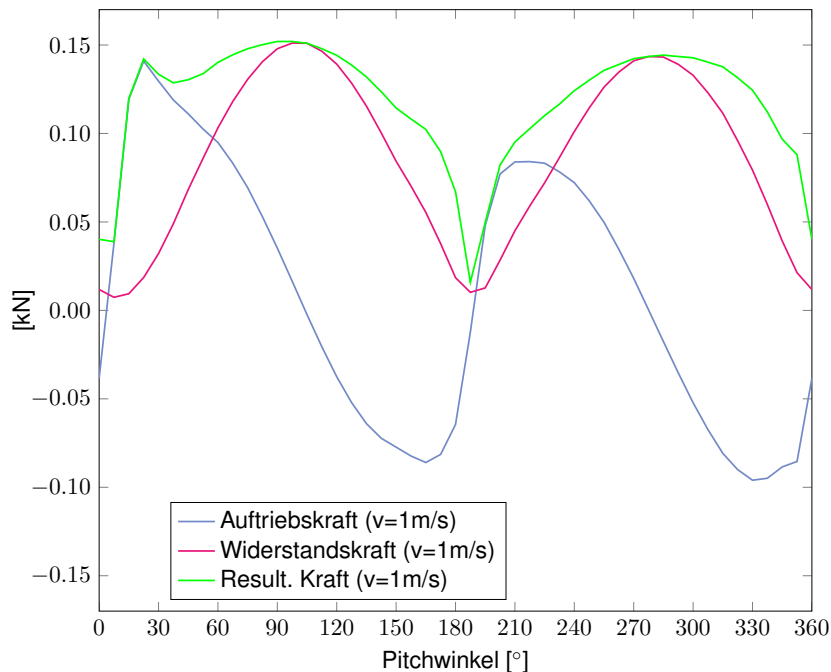
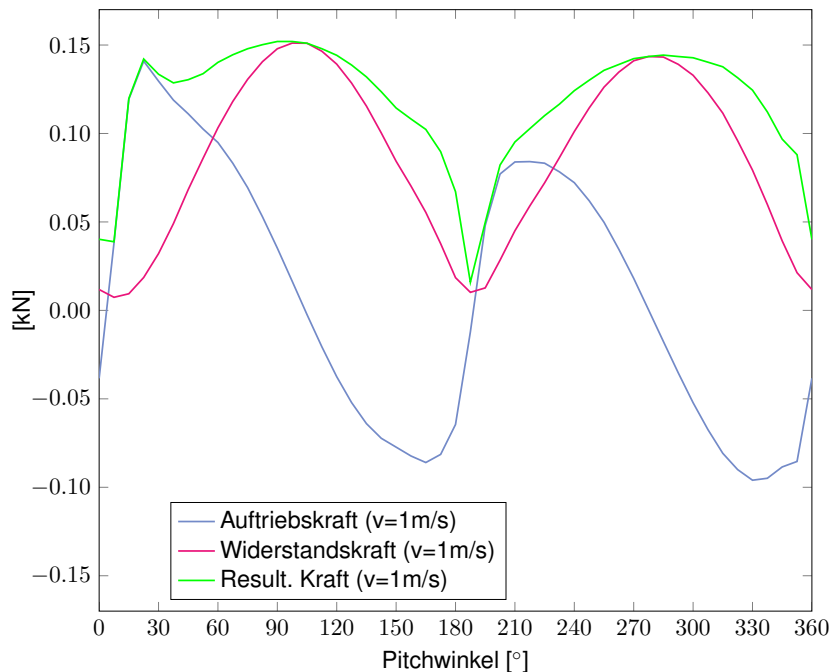
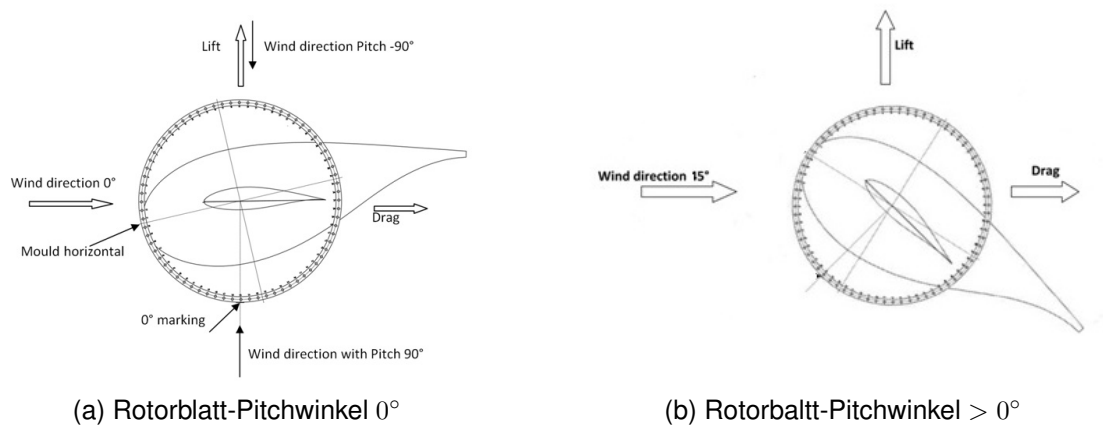


Abbildung 4.12.: Darstellung der aerodynamischen Auftriebs- und Widerstandskräfte des Blattes für 1 m/s Anströmgeschwindigkeit, siehe Tabelle A.3

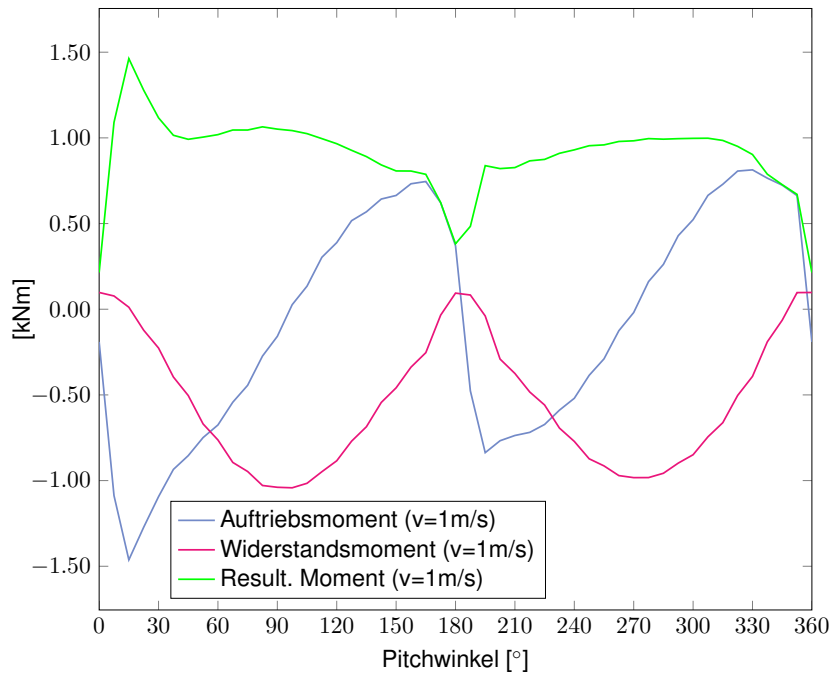


Abbildung 4.13.: Darstellung der aerodynamischen Auftriebs- und Widerstandsmomente des Blattes für 1m/s Anströmgeschwindigkeit, siehe Tabelle A.4

Die Auftriebs- und Widerstandskräfte F_A und F_W können bei gleicher Anströmrichtung auf beliebige Strömungsgeschwindigkeiten umgerechnet werden.

$$F_{A/W} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot A_{A/W, \text{projiziert}} \cdot v_{\text{an}}^2 \quad (4.1)$$

$$F(v_{\text{an}})_{A/W} = F(v = 1 \text{ m/s})_{A/W} \cdot \frac{v_{\text{an},2}^2}{1} \quad (4.2)$$

Da

$$M_{A/W} = F_{A/W} \cdot s$$

ist, gilt Gleichung 4.2 auch für Momente wenn der Hebelarm s konstant bleibt.

Die Windgeschwindigkeit wird nach den Anforderungen Abschnitt(2.4) mit $v_{\text{Wind}} = v_{\text{an}} 14 \text{ m/s}$ als Grenzfall angenommen.

Fall 1, größtes Auftriebsmoment: Für einen Pitchwinkel von

$$\alpha_{\text{max,A}} = 13,6^\circ$$

ist das Auftriebsmoment um den Schwerpunkt des Blattes maximal. Dabei ist die in Abbildung 4.11a eingezeichnete Linie „Mould horizontal“ in Strömungsrichtung. Mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern liegt auf ihr auch der Schwerpunkt des Blattes.

Gemäß Gleichung 4.2 folgt für eine Windgeschwindigkeit von $v_{\text{an}} = 14\text{m/s}$:

$$F_A(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = 0,1194\text{kN} \cdot \frac{14^2\text{m}^2/\text{s}^2}{1^2\text{m}^2/\text{s}^2}$$

$$F_A(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = \underline{23,40\text{kN}}$$

$$F_W(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = 0,094\text{kN} \cdot \frac{14^2\text{m}^2/\text{s}^2}{1^2\text{m}^2/\text{s}^2}$$

$$F_W(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = \underline{1,842\text{kN}}$$

$$M_{A,S}(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = 1,487\text{kNm} \cdot \frac{14^2\text{m}^2/\text{s}^2}{1^2\text{m}^2/\text{s}^2}$$

$$M_{A,S}(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = \underline{291,5\text{kNm}}$$

$$M_{W,S}(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = -0,036\text{kNm} \cdot \frac{14^2\text{m}^2/\text{s}^2}{1^2\text{m}^2/\text{s}^2}$$

$$M_{W,S}(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = \underline{-7,056\text{kNm}}$$

Fall 2, größtes Widerstandsmoment: Für einen Pitchwinkel von

$$\alpha_{\text{max,W}} = 97^\circ$$

ist das Widerstandsmoment um den Schwerpunkt des Blattes maximal. Auftreibe- und Widerstandsmomente:

$$M_{A,S}(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = -0,011\text{kNm} \cdot \frac{14^2\text{m}^2/\text{s}^2}{1^2\text{m}^2/\text{s}^2}$$

$$M_{A,S}(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = \underline{-2,156\text{kNm}}$$

$$M_{W,S}(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = 1,041\text{kNm} \cdot \frac{14^2\text{m}^2/\text{s}^2}{1^2\text{m}^2/\text{s}^2}$$

$$M_{W,S}(v_{\text{an}} = 14\text{m/s}) = \underline{204,0\text{kNm}}$$

Die Anströmung mit dem größten Luftwiderstandsmoment lenkt das Blatt weniger stark aus als Fall 1. Daher wird die weitere Abschätzung der Haltekräfte für den Fall des maximalen Auftriebsmomentes durchgeführt. Beide verursachen eine Drehung der Blattspitze um den Schwerpunkt zur Saugseite hin.

Halten des Blattes

Die folgenden Rechnungen basieren auf der Abbildung 4.14. Dort ist ein Ausschnitt der Blattes unter einem beliebigen Drehwinkel skizziert. Das dargestellte Element soll

dabei ein einfacher Balken sein. Die gezeichnete Höhe des Balkens (z-Richtung) dient nur dazu die 4 Lagerstellen auseinanderzuhalten. Die Haltepunkte an der Blattoberfläche werden zu vier Lagerstellen zusammengefasst. Da sie gering ist und die genaue Position der Lager noch unbekannt ist, wird die zur Spitze hin zulaufende Form des Blattes vernachlässigt. Allein durch die Klemmkräfte kann das Blatt in den gewollten Ausrichtungen gehalten werden (siehe weiter unten). Außerdem wird die Vereinfachung vorgenommen, dass die Angriffspunkte an der Blattoberfläche senkrecht über der Schwerachse stehen, $y_S = 0$. Dadurch wird das Eigengewichtsmoment $M_{G,S,x} = y_S \cdot F_G \cos(\varphi_{\text{Rot},S,y}) = 0$. Es gibt zwei Grenzfälle. Der erste Fall ist das senkrecht hängende Blatt, der zweite das waagrecht ausgerichtete.

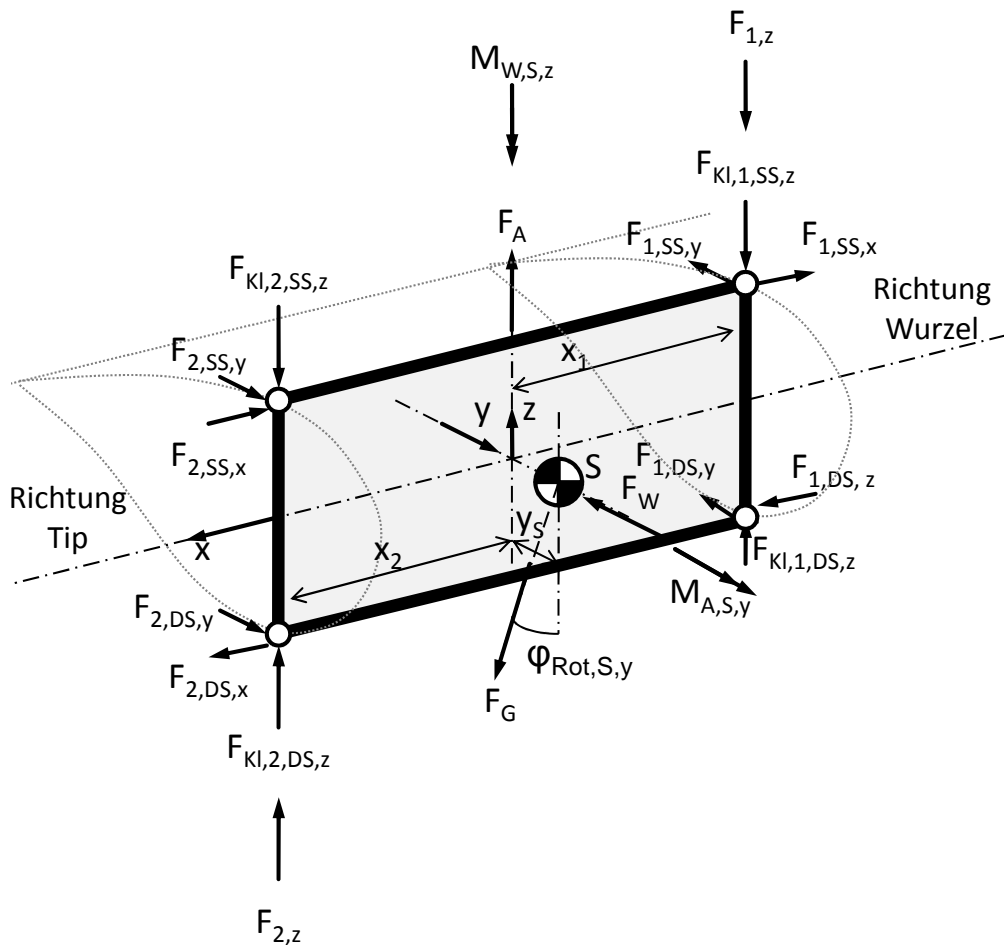


Abbildung 4.14.: Zur Bestimmung der Haltekräfte und Hebelarme

Das Blatt muss durch Haftreibung gehalten werden. Bei einem Haftreibungskoeffizienten von $f_{\text{Haft}} = 0,3$ zwischen Blattoberfläche und Halteplatte und vier Haltepunkten folgt unter Berücksichtigung des Stoßfaktors von $S_{\text{Stoß}} = 2,5$ für den Fall, dass das Blatt

senkrecht hängt:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{Halt}} &= F_{\text{G,Blatt}}/f_{\text{Haft}} \cdot S_{\text{Stoß}}/n_{\text{Haltepunkte}} & (4.3) \\
 &= 16,5t \cdot 9.81\text{kgm/s}^2/0,3 \cdot 2/4 \\
 F_{\text{Halt}} &= \underline{337,2\text{kN}}
 \end{aligned}$$

In jedem der Haltepunkte im Ersatzbild muss die Summe der Kraftvektoren in x-, und y-Richtung kleiner sein als die haltende Kraft $F_{\text{Haft}} = 0,3 \cdot F_{\text{Halt}}$. Für das Ersatzbild gilt für $x_1 = x_2$:

$$F_{\text{Kl},1,\text{DS},z} = F_{\text{Kl},2,\text{DS},z} = F_{\text{Kl},1,\text{SS},z} = F_{\text{Kl},2,\text{SS},z} = F_{\text{Halt}}$$

Die mit den Indizes x und y versehenen Kräfte an den vier Knoten sind als Reaktionskräfte gleich den Reibkräften an der jeweiligen Stelle.

Bei einer Momentendrehung um die y-Achse werden zwei Lager entlastet. Auf die anderen beiden wirken die Reaktionskräfte $F_{1,z}$ und $F_{2,z}$. Kräfte- und Momentengleichgewichte:

$$\Sigma F_x : \quad -F_{2,\text{SS},x} - F_{1,\text{SS},x} + F_{2,\text{DS},x} + F_{1,\text{DS},x} + F_G \cdot \sin(\varphi_{\text{Rot},\text{S},y}) = 0 \quad (4.4)$$

$$\Sigma F_y : \quad F_{2,\text{SS},y} + F_{2,\text{DS},y} - F_{1,\text{SS},y} - F_{1,\text{DS},y} - F_D = 0 \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma F_z : \quad & -F_{\text{Kl},2,\text{SS},z} - F_{\text{Kl},1,\text{SS},z} - F_{1,z} + F_{\text{Kl},2,\text{DS},z} + F_{\text{Kl},1,\text{DS},z} + F_{1,z} \cdots \\
 & \cdots - F_G \cdot \cos(\varphi_{\text{Rot},\text{S},y}) + F_A = 0 \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

$$\Sigma M_{0,x} : \quad -F_G \cdot \cos(\varphi_{\text{Rot},\text{S},y}) \cdot y_S = 0 \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
 \Sigma M_{0,y} : \quad & (F_{\text{Kl},2,\text{SS},z} - F_{\text{Kl},2,\text{DS},z} - F_{2,z}) \cdot x_2 + \cdots \\
 & \cdots (-F_{\text{Kl},1,\text{SS},z} + F_{\text{Kl},1,\text{DS},z} - F_{1,z}) \cdot x_1 + M_{\text{A},\text{S},y} = 0 \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

$$\Sigma M_{0,z} : \quad (F_{2,\text{SS},y} + F_{2,\text{DS},y}) \cdot x_2 + (F_{1,\text{SS},y} + F_{1,\text{DS},y}) \cdot x_1 - M_{\text{W},\text{S},z} = 0 \quad (4.9)$$

Die Hebelarme x_1 und x_2 sollen gleich sein. Wegen der Symmetrie folgt für die Kräfte:

$$F_{2,\text{SS},y} = F_{2,\text{DS},y} = -F_{1,\text{SS},y} = -F_{1,\text{DS},y} = F_{y,1/2}$$

$$M_{\text{W},\text{S},z} = 4 \cdot x_{1,2} \cdot F_{y,\text{DS}/\text{SS},1/2}$$

Haben die Lagerstellen einen Abstand von $2x_1 = 6m$, so wird

$$\begin{aligned}
 |F_{1/2,\text{DS}/\text{SS},y}| &= \frac{M_{\text{W},\text{S},z}}{4 \cdot x_{1,2}} \\
 &= \frac{-7,056\text{kNm}}{4 \cdot 3m} \\
 &= \underline{-0,855\text{kN}}
 \end{aligned}$$

Die Klemmkräfte $F_{\text{Kl},1,\text{SS},z}$, $F_{\text{Kl},1,\text{DS},z}$, $F_{\text{Kl},2,\text{SS},z}$, $F_{\text{Kl},2,\text{DS},z}$, sind durch F_{Halt} vorgegeben.

Wegen Symmetrie folgt außerdem:

$$\begin{aligned} F_{2,z} &= -F_{1,z} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{A,S,y}}{x_1} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{291,5kNm}{3m} \\ &= \underline{48,58kN} \end{aligned}$$

Für einen beliebigen Winkel sind wegen der Annahme eines stabförmigen Balkens

$$F_{1,SS,x} = F_{2,SS,x} = -F_{1,DS,x} = -F_{2,DS,x} = \frac{1}{4} \cdot F_G \cdot \sin(\varphi_{Rot,S,y})$$

Demnach verschwinden diese Kräfte wenn das Blatt waagrecht, maximal wenn es senkrecht hängt. Mit dem letzteren Fall wurde oben bereits die erforderliche Klemmkraft für die 4 Haltepunkte bestimmt.

Jeder Auflagerpunkt soll aus zwei Flächen bestehen, die die Kräfte in die Gurte des Blattes einleiten. Die Größe jeder Auflagerfläche wird zu 400mm × 500mm festgelegt. Sie haben damit eine Fläche von jeweils

$$A_{G-B} = 0,2m^2$$

Die Klemmkräfte mit denen das Blatt gehalten wird, dürfen nicht so groß sein, dass die Flächenpressung an der Blattschale überschritten wird. Am Lager 1,DS und 2,SS wirken nur die Klemmkräfte F_{Halt} . Mit A_{G-B} folgt

$$\frac{F_{Halt}}{A_{G-B}} = \frac{337,2kN}{2 \cdot 0,2m^2} = \underline{0,843N/mm^2}$$

Am Lager 2,DS und 1,SS wirken nur die Klemmkräfte $F_{Halt} + F_{2,z}$. Mit A_{G-B} folgt

$$\frac{F_{Halt}}{A_{G-B}} = \frac{337,2kN + 48,58kN}{2 \cdot 0,2m^2} = \underline{0,965N/mm^2}$$

Die zulässige Flächenpressung wird nicht überschritten. Es wäre sogar zulässig das Blatt an den Beulfeldern neben den Gurten zu greifen.

Unter der Annahme, dass der Reibkoeffizient $f_{Haft} \geq 0,3$ ist, folgt, dass der Winkel bei dem das Blatt aus dem Greifer Rutschen würde, wegen

$$f_{Haft} = F_N / F_{Haft} = \tan(\varphi_{Haft,grenz}) \quad (4.10)$$

einen Wert von $\varphi_{\text{Haft,grenz}} = 16,7^\circ$ annimmt. Die Neigung der Blattoberfläche an den Lagerstellen beträgt etwa 2° . Damit müsste das Blatt mehr als 14° über die horizontale Endlage hinaus gedreht werden.

Seilkräfte für den Hub

Die größte Seilkraft um die Vorrichtung am Turm zu halten wird in der oberen Endposition benötigt (Abbildung 4.15). Der Schrägzug ist dort am größten. Der Winkel zwischen der Vertikalen und dem Turm beträgt dort $\varphi_{\text{Seil,oben}} = 45^\circ$. Es wird angenommen, dass die Vorrichtung die Hälfte der Masse des Rotorblattes hat. Der horizontale Abstand von Blattschwerpunkt zur Turmoberfläche beträgt ca. $5m$. Ist der Schwerpunkt der leeren Vorrichtung genau zwischen Turm und Blattnase, so liegt der Gesamtschwerpunkt der beladenen Vorrichtung in einer Entfernung $c \approx 4100mm$ von den Lagern A und B vor dem Turm. Die Seilkraft wird durch ein Kräftegleichgewicht in vertikaler Richtung gefunden. Die Rollen werden als Reibungsfrei angenommen, so dass nur die Normalkräfte auf den Turm eingehen.

$$\begin{aligned}\Sigma F \uparrow: \quad F_S &= F_{B+G} \cdot 1 / \cos(\varphi_{\text{Seil,oben}}) \cdot S_{\text{Stoß}} \\ &= 243kN \cdot 1 / \cos(56^\circ) \cdot 2,5 \\ &= \underline{859,1kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma F \rightarrow: \quad 0 &= F_S \cdot \sin(\varphi_{\text{Seil,oben}}) - F_A - F_B \\ F_B &= F_S \cdot \sin(\varphi_{\text{Seil,oben}}) - F_A\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma M_B \curvearrowright: \quad 0 &= F_{B+G} \cdot S_{\text{Stoß}} \cdot c - F_S \cdot \sin(\varphi_{\text{Seil,oben}}) \cdot (a + b + e) - \dots \\ &\quad \dots - F_S \cdot \cos(\varphi_{\text{Seil,oben}}) \cdot d + F_A \cdot (a + b) \\ F_A &= \frac{1}{a + b} \cdot (-F_{B+G} S_{\text{Stoß}} \cdot c + F_S \cdot \sin(\varphi_{\text{Seil,oben}}) \cdot (a + b + e) + \dots \\ &\quad \dots + F_S \cdot \cos(\varphi_{\text{Seil,oben}}) \cdot d) \\ &= \frac{1}{7m} \cdot (-607,5kN \cdot 4,1m + \dots \\ &\quad \dots + 859,1kN \cdot \sin(45^\circ) \cdot (6,5m) + 859,1kN \cdot \cos(45^\circ) \cdot 0,5m) \\ F_A &= \underline{251,7kN} \\ \hookrightarrow \quad F_B &= \underline{355,8kN}\end{aligned}$$

Die Kräfte an A und B sind beide positiv. Dies bedeutet, dass der Wagen im Kontakt mit dem Turm bleibt. Wird das Blatt, dessen Saugseite nach dem Drehen nach oben zeigt, mit 14m/s Wind angeströmt so wirkt die bereits bestimmte Auftriebskraft von $F_A(v_{an} = 14\text{m/s}) = 23,40\text{kNm}$. Dies reicht nicht aus, die Gewichtskraft des Blattes von 160kN zu überwinden. Der Außerdem wirkt eine Lufwiderstandskraft etwa in Richtung von F_A und F_B . Sie ist jedoch mit $F_W(v_{an} = 14\text{m/s}) = 1,842\text{kN}$ ebenfalls zu klein damit die Vorrichtung sich vom Turm löst.

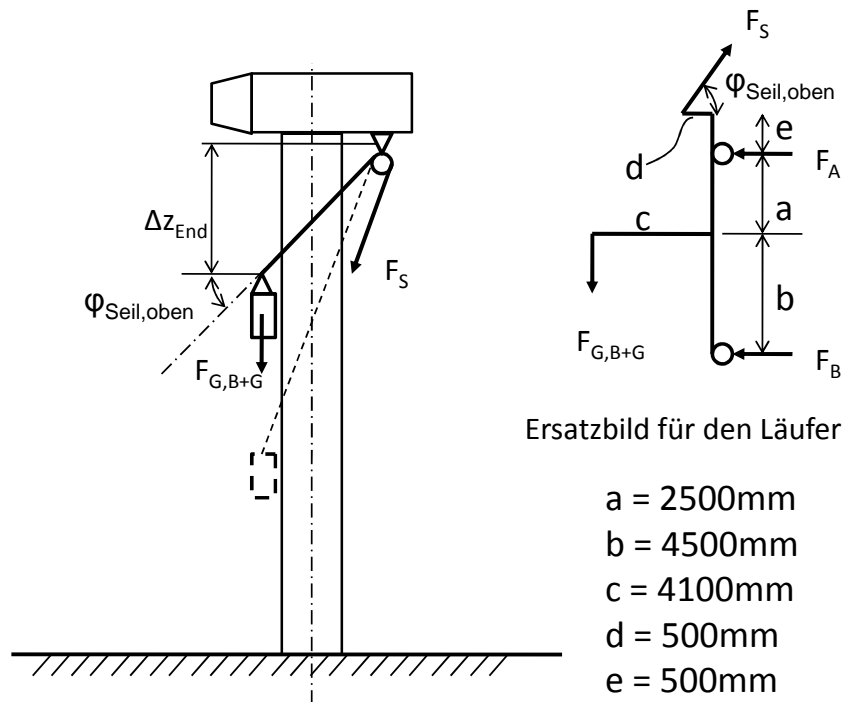


Abbildung 4.15.: Skizze des Greiferwagens zur Bestimmung der Seilkraft und Kontaktkräften

Anzahl Laufrollen

Oben wurden die Kontaktkräfte auf den Turm bestimmt. Für die Hubvorrichtung sollen Gummirollen zum Einsatz kommen. Dies sollten Schwerlasträder sein. Die Vorrichtung läuft auf Rollen auf der Turmoberfläche. Um die Punktlasten auf den Turm ausreichen gering zu halten werden mehrere Rollen eingesetzt (Abbildung 4.16). Die maximale Kraft auf den Turm durch den Greiferwagen wurde oben zu $F_B = 355,8\text{kN}$ bestimmt. Der Radius des Turms beträgt minimal $D_{\text{Turm,min}} = 4\text{m}$.

Das Rollenpaket übt $F_{\text{Rolle}} = F_B / (2 \cos(\varphi_{\text{Turmrollen}/2}) = 184,2\text{kN}$ Kraft auf den Turm aus.

Bei der Verwendung von Schwerlastrollen mit Laufflächen aus Polyurethan-Elastomer kann ein E-Modul von $E_{\text{PU}} = 900\text{N/mm}^2$ [28] angenommen werden. Übliche Schwer-

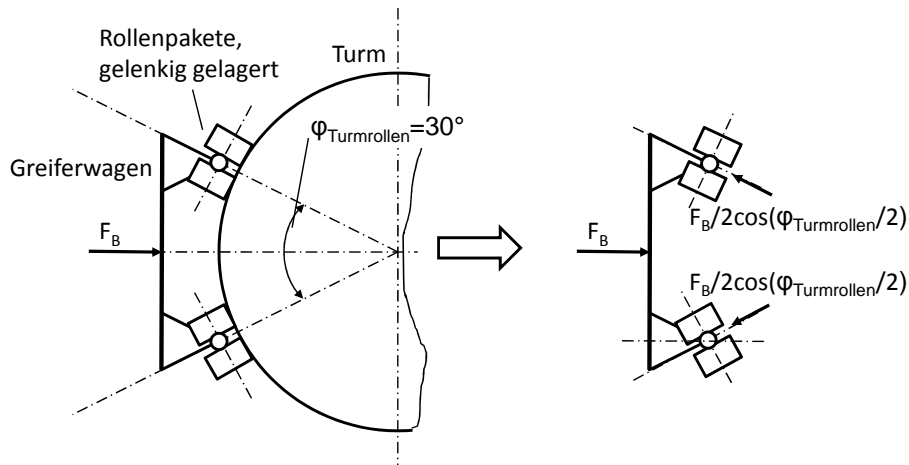


Abbildung 4.16.: Zur Bestimmung Kräfte auf den Turm

lastrollen haben einen Durchmesser von $d = 500\text{mm}$ und eine Breite von $b = 200\text{mm}$. Die maximale Hertz'sche Pressung für eine Rolle mit Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$:

$$\begin{aligned}
 p_{\max} &= \text{sqrt} \frac{F_{\text{Rolle}} \cdot E_{\text{PU}}}{\pi \cdot d \cdot b \nu^2} & (4.11) \\
 &= \sqrt{\frac{184200\text{N} \cdot 900\text{N/mm}^2}{\pi \cdot 500\text{mm} \cdot 200\text{mm} \cdot 0,3^2}} \\
 &= \underline{76,57\text{N/mm}^2}
 \end{aligned}$$

Für einen Baustahl S235 ist $Re = 235\text{N/mm}^2$. Die Zulässige Spannung gegen Beulen ist unter Berücksichtigung der Anforderungsliste

$$\sigma_{\text{zul,Beul}} = Re / S_{\text{Beul}} = 47\text{N/mm}^2$$

. Damit werden an jedem der vier Auflagepunkte des Wagens

$$\frac{p_{\max}}{\sigma_{\text{zul,Beul}}} = 1,63$$

Rollen benötigt. Die Skizzen zeigen je 2 Rollen.

4.4.2. Lösung B: Hängender Greifer

Beschreibung der Lösung

Das Blatt zeigt bei dieser Lösung mit der Nase vom Turm weg. Die zweite Lösung ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Träger (1) auf der dem zu demontierenden Blatt ge-

genüberliegenden Seite der Nabe montiert wird. Dazu werden die Befestigungspunkte für die Sternmontage benutzt (Abbildung 4.18). Dies geschieht mit dem Bordkran der Anlage. Vor der Nabe befindet sich an dem Träger eine horizontal ausgerichtete Linearführung (2). An dieser ist eine Schere mit Umlenkrollen eines Flaschenzuges angebracht (3) über die ein Seil (4) geführt wird. Ein Ende des Seils wird schräg nach unten von der Anlage weg geführt (5). Das andere Ende hängt senkrecht nach unten und ist in einem Flaschenzug ausgeführt (6). An der Flasche hängt eine Traverse (7) an Kettenzügen (8) hängt wiederum eine Vorrichtung mit einem Greifsystem (9) und einem Gegengewicht (10). Führungsseile (11) stabilisieren den Hub und richten den Greifer aus. Der leere Greifer wird schräg von vorne an das Blatt herangezogen. In der richtigen Position wird er an das Blatt herangelassen und Greift das Blatt. Der Halt erfolgt mittels Reibschluss. Die Bolzenverbindungen können nun gelöst werden. Das Ausfädeln des Blattes geschieht durch Kombination aus Senkvorgang und Linearbewegung (2). Das ausgefädelte Blatt wird herabgelassen. Zwischendurch wird angehalten um das Blatt mit den Kettenzügen an der Traverse auf die Druckseite zu drehen. Im folgenden Senkvorgang wird die Vorrichtung vom Turm weggezogen, am Boden abgesetzt und dort geöffnet. Das Blatt kann nun Durch einen Kran oder Flurförderfahrzeuge entnommen und in Transportgestelle verbracht werden.

Windlasten

Als Windlasten die durch das Rotorblatt entstehen, werden die gleichen angenommen wie im Abschnitt 4.4.1. Die Ausrichtung des Rotorblattes ist die gleiche, wie in der oben dargestellten Lösung, nur dass der Prichwinkel bei den (De-)Montage um 180° verdreht ist. Da das Blatt auf die selbe Seite gedreht wird, Druckseite nach unten, wird als ungünstigster Fall angenommen, dass das Blatt so angeströmt wird, dass sein Auftrieb maximal ist.

Greif- und Halteprinzip

Das Greif- und Halteprinzip ist ähnlich dem von Lösungsvariante A. Das Blatt ist zwar an der Anlage um 180° gedreht, die Auftriebs-, Widerstands-, Klemm- und Lagerkräfte und -Momente sind mit den oben genannten Abstraktionen auch hier anwendbar. Um die Vorrichtung mitsamt Blatt in der Waage zu halten wird ein Gegengewicht verwendet. Um einen Abstand des Gesamtschwerpunktes zu dem des Blattes von etwa 2,5m zu erreichen muss ein Gegengewicht von etwa $m_{\text{GGewicht}} = 8,25t$ in 5m Abstand in der entgegengesetzten Richtung angebracht sein. Abbildung 4.19 ist eine Skizze zum Halteprinzip. Zwei Spindeln bewegen die saugseitigen Arme. Das Blatt wird mit den acht Halteflächen gehalten.

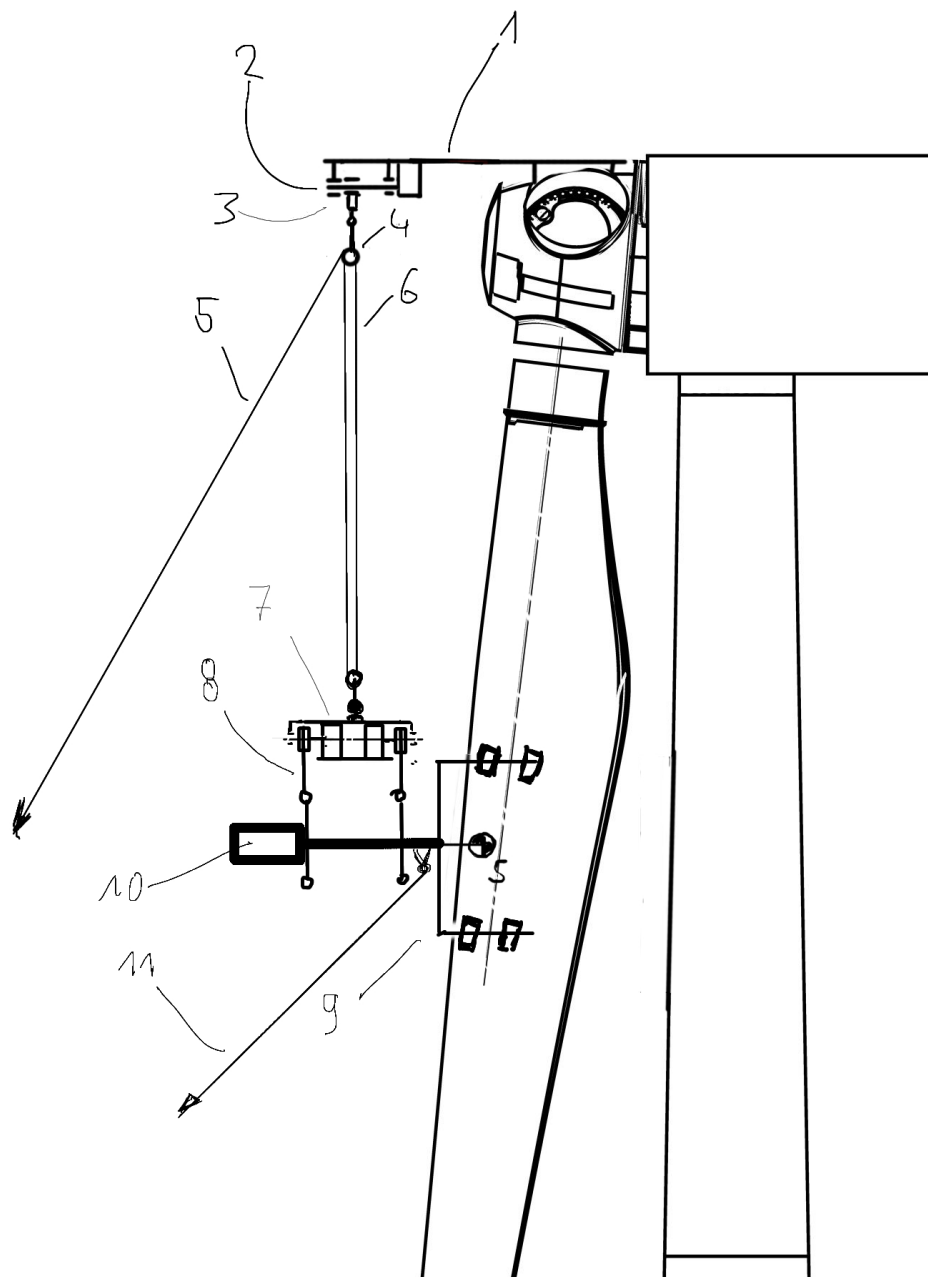


Abbildung 4.17.: Skizze zu Gesamtlösung B

Drehen des Blattes

Das Drehen des Blattes soll mit zwei Kettzügen erfolgen. Das erforderliche Drehmoment ist größer als bei Lösungsvariante A, da ein Gegengewicht verwendet wird.

Nimmt man an, dass das Gegengewicht ein Quader ist, dessen Abmessungen senkrecht zur Drehachse je $a = 1\text{m}$ betragen so ist das Trägheitsmoment des Gegenge-

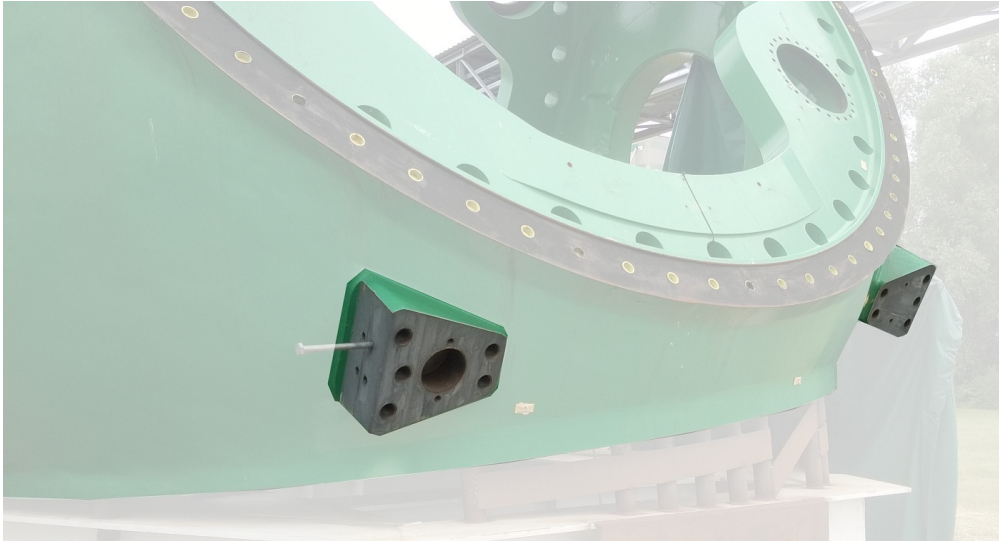


Abbildung 4.18.: Anschraubpunkte für Sternmontage an der Nabe

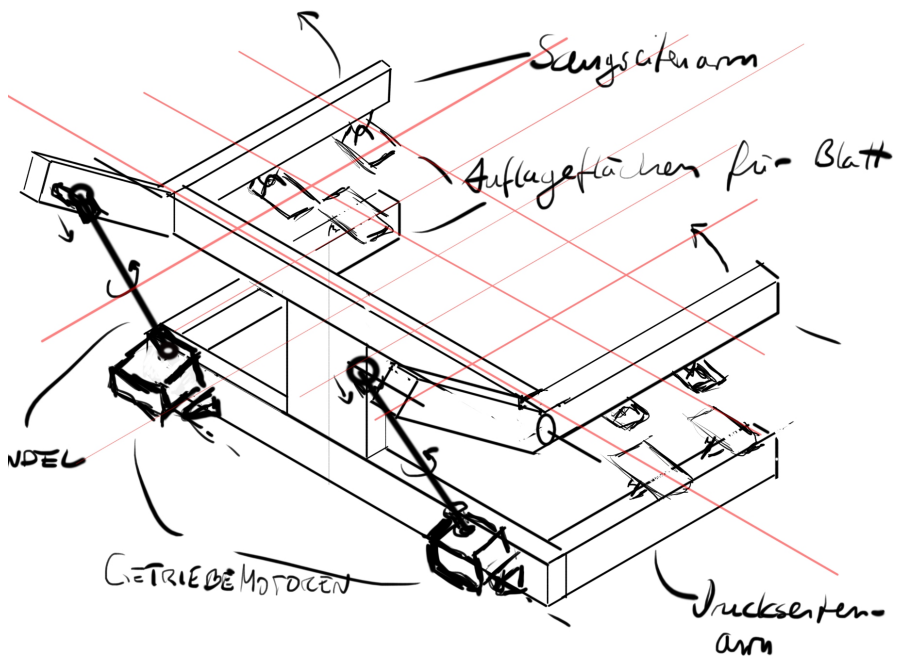


Abbildung 4.19.: Skizze des Greifmechanismus.

wichtiges

$$\begin{aligned} J_{\text{GGewicht}} &= \frac{1}{6} \cdot m_{\text{GGewicht}} \cdot a^2 \\ &= \underline{1375 \text{ kgm}^2} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Das Trägheitsmoment des Blattes bezüglich der Rotormitte ist etwa $J_{\text{Blatt,R,y}} = 8,757 \times 10^6 \text{ kgm}^2$. Die Rotormitte ist $R_S = 18 \text{ m}$ vom Blattschwerpunkt entfernt. Das Trägheitsmoment des Blattes bei der Drehung um die y-Achse im Schwerpunkt wird mittels des „Steinerschen Satzes“ modifiziert.

$$\begin{aligned} J_{\text{Blatt,S,y}} &= J_{\text{Blatt,R,y}} - m_{\text{Blatt}} \cdot R_S^2 \\ &= \underline{3,411 \times 10^6 \text{ kgm}^2} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Das Trägheitsmoment ist für den Schwerpunkt als Bezugspunkt minimal. Das Drehen des Blattes soll langsam erfolgen. Mit dem geringen Trägheitsmoment entstehen somit unrealistisch kleine Lasten. Der Drehung auf die Druckseite entgegen wirkt eine Windanströmung der Saugseite. $F_{\text{t}extW}(\alpha = 277,5^\circ) = 27,66 \text{ kN}$ für $v_{\text{Wind}} = 14 \text{ m/s}$ (siehe auch Lösung A, Windlasten sowie Abbildungen 4.12,4.13). Der Angriffspunkt dieser Kraft ist bei $L_{23,46} \text{ m}$. Damit ist das Widerstandmoment um den Schwerpunkt $M_{\text{t}extW,S}(\alpha = 277,5^\circ) = 192,6 \text{ kNm}$

Die erforderliche Arbeit und Leistung wird, wenn das Blatt in 5 Minuten um 90° gedreht werden soll:

$$\begin{aligned} W_{\text{BTV,rot,S,y}} &= \frac{1}{2} (J_{\text{Blatt,S,y}} + J_{\text{GGewicht}}) \cdot \dot{\varphi}_{\text{BTV,rot,S,y}}^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 3412375 \text{ kgm}^2 \cdot \left(\frac{\pi}{600} \text{ s}^{-1} \right)^2 \\ &= \underline{292,35 \text{ J}} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Dies ist das dynamische Antriebsmoment

$$M_{\text{dyn}} = 46,78 \text{ Nm}$$

das der Motor aufbringen muss.

Wenn der Greifer richtig positioniert wurde wirkt als statisches Drehmoment noch das Auftriebsmoment des Blattes. Im Fall der Drehung von der Waagerechten in die Senkrechte wirkt das oben bestimmte maximale Auftriebsmoment der Drehung entgegen. Bei einer Fehlpositionierung des Greifers von 100mm kann ein zusätzliches statisches

Moment durch die Gewichtskraft des Blattes entstehen.

$$\begin{aligned}
 M_{\text{stat,G}} &= 0,1\text{m} \cdot 16,5\text{t} \cdot 9,81\text{kgm/s}^2 \\
 &= 16,2\text{kNm} \\
 M_{\text{ges}} &\geq M_{\text{dyn}} + M_{\text{stat,G}} + M_{\text{A,S}} \\
 &= 0,04678\text{kNm} + 16,2\text{kNm} + 291,5\text{kNm} \\
 &= \underline{307,7\text{kNm}}
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

Bei diesem Drehmoment wird ein Getriebemotor benötigt. Eine kurze Recherche nach Anbietern kam zu dem Ergebnis, dass hier wahrscheinlich eine Sonderanfertigung notwendig wird.

Diese Werte können fast genau so auch für Lösung A angewendet werden. Die Wind- und Gewichtslasten sind fast identisch. Einzig das dynamische Moment wird anders sein. Es ist aber klein gegenüber den anderen.

4.4.3. Lösung C: An Bolzen hängendes Blatt

Beschreibung der Lösung

Die dritte Gesamtlösung - der grüne Pfad in Tabelle 4.1 - ist vom konstruktiv am einfachsten. Abbildung 4.20 zeigt einen Querschnitt durch die Nabe (4) der WEA. Das Rotorblatt (1) ist hier am Pitchlager (9) befestigt dargestellt. In einen Querbolzen (2) ist eine Presshülse mit Gewindeende (3, Abb. 5.2) geschraubt, in die ein Seil (6) eingepresst ist. Sie ersetzt den vorne liegenden Dehnbolzen des Blattes. Der Pitchwinkel des Blattes ist so eingestellt, dass die Endkante an der Anlage nach vorne zeigt. An einem Träger (7), der mittels einer Klemmverbindung (10) an der Nabe (4) befestigt ist, befinden sich mehrere Umlenkrollen (5). Der Träger ragt mit der letzten Umlenkrolle aus der Nabenverkleidung (8) heraus. Zwei zusätzliche Umlenkrollen (11) sind so positioniert, dass Seile in um 120° vom ersten ersetzten Dehnbolzen versetzt geführt werden können. Diese Umlenkrollen sind an den Durchgangsbohrungen für das Anziehen der Bolzenverbindungen eingesetzt. An diesen Stellen sind ebenfalls Dehnbolzen durch Seilendhülsen mit Gewindeende montiert. Die insgesamt drei Seile werden über Umlenkrollen und Träger aus der Front der Nabenverkleidung herausgeführt. Am Boden stehen Seilwinden, mit denen die Seile kontrolliert werden. Siehe dazu auch Abbildung 4.21.

An einem an der tipseitigen Transportverstärkung angebrachtem Anschlagpunkt führt ein Kran das Blatt. Auf diese Weise kann es beim Herablassen gedreht werden.

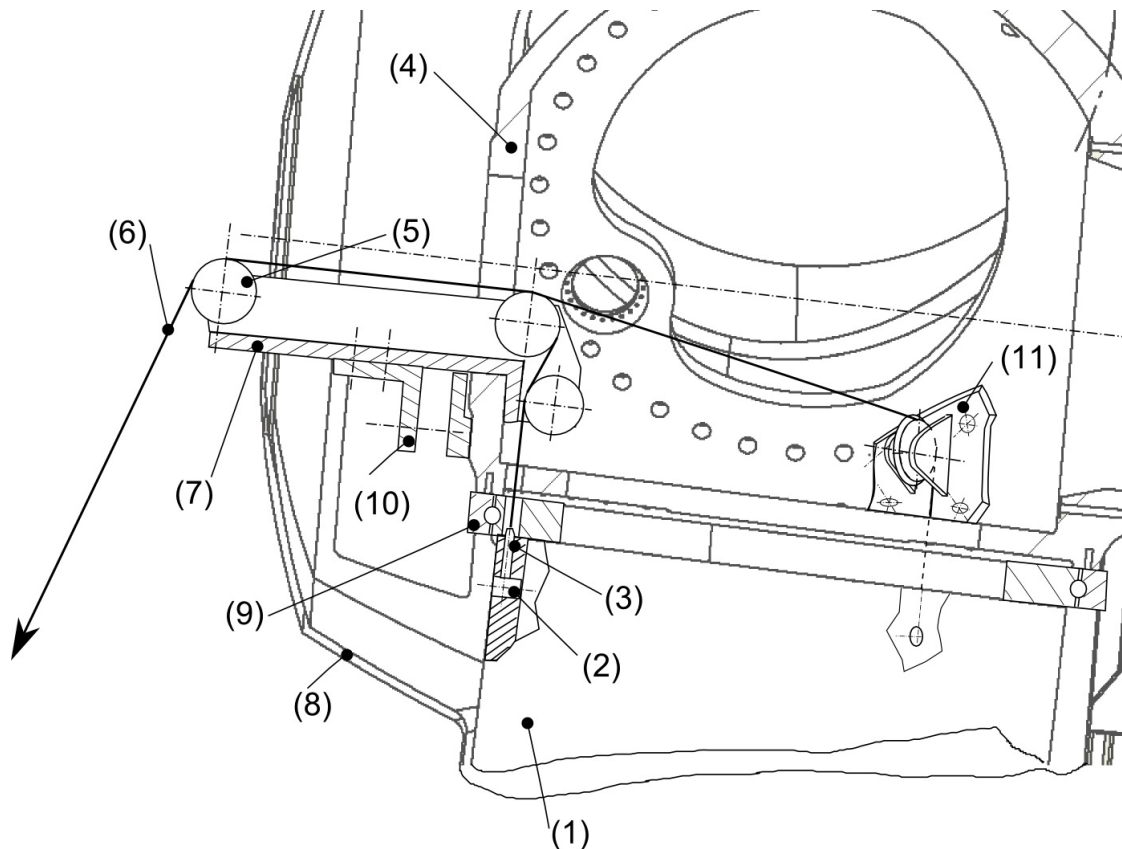


Abbildung 4.20.: Querschnitt durch die Blattlagerung für Lösungsvariante C

Befindet sich das Blatt in der Waagerechten, kann ein zweiter Mobilkran das Blatt an der Wurzel übernehmen. Das Blatt kann dann endgültig gelagert werden.

Bei der Montage werden zunächst die drei Hebeseile von der Nabe aus heruntergelassen und am liegenden Blatt befestigt.

Diese Lösung hat für den Anwendungsfall der M5000-116 WEA den Nachteil, dass es schwierig sein wird die benötigten Teile für den Hub sicher in der Nabe zu befestigen. In Abbildung 4.20 sind Seilrollenhalter (11) skizziert, die in die Durchgangsbohrungen der Nase eingreifen und auf diese Weise Seilumlenkrollen für zwei weitere Bolzen halten. Für eine Neukonstruktion können aber entsprechende Anschlag- oder Anschraubpunkte vorgesehen werden. Dann ist dieses Verfahren das günstigste, am schnellsten transportierbare und wartungsärmste der drei vorgestellten.

Greif- und Halteprinzip

Das Blatt hängt an drei Seilen an seiner Wurzel. Im extremen Fall hängt die gesamte Blattmasse an einem Bolzen. Bei Herablassen von der Anlage wird die Last mit



Abbildung 4.21.: Isometrische Ansicht für Lösungsvariante C

zunehmender Drehung des Blattes auf den Bolzen und die an der zweiten Transportverstärkung angebrachte Kranführung aufgeteilt.

Zusätzliche Seile die von der Wurzel zum Boden führen, können dazu benutzt werden den Abstand des Blattes zur Turmstruktur zu erhöhen und seine Bewegungen zu kontrollieren.

Drehen des Blattes

Das Drehen des Blattes erfolgt durch einen Kran der an der äußeren Transportverstärkung angreift. Er hebt dabei beim Herablassen des Blattes den Tip an. Das Blatt wird quer vor dem Turm gedreht. Wird der Tip schräg von der Anlage weggezogen, können verschiedene Pitchwinkel beim Ablegen am Boden realisiert werden. Abbildung 4.22 zeigt drei Stufen der Demontage eines Blattes mit dessen Drehung. Bei der dargestellten Drehung wird das Blatt auf seiner Druckseite abgelegt.

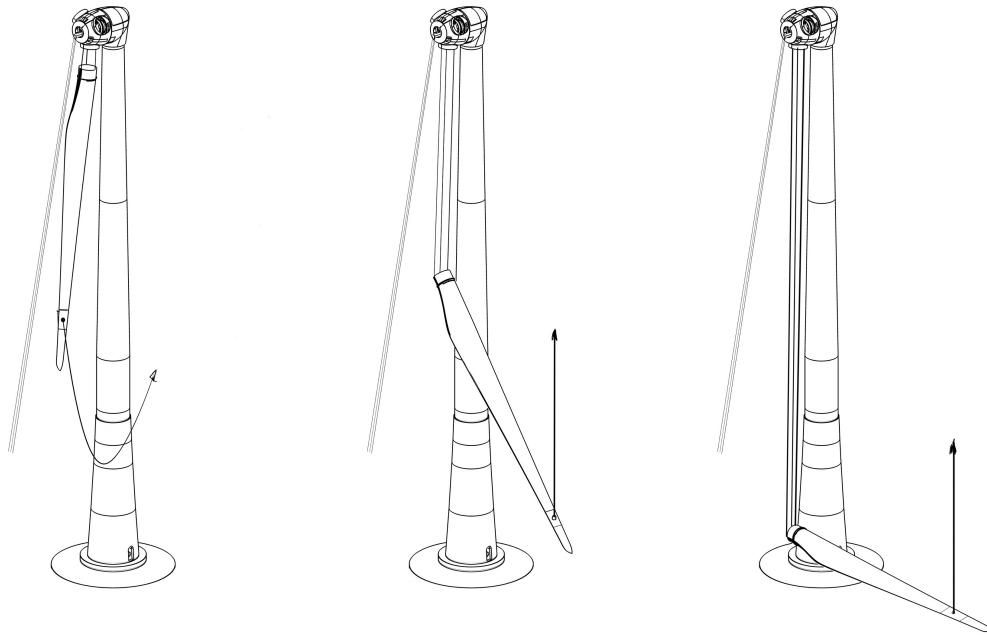


Abbildung 4.22.: Ablauf (De)Montageverfahren Lösung C

Ablegen des Blattes

Die Blattspitze wird bereits durch einen Kran an der äußeren Transportverstärkung geführt. Bevor das Blatt an der Wurzel von den drei Hubseilen befreit wird, wird ein zweiter Mobilkran die Wurzel übernehmen. Dazu reicht es, einen Schwerlastgurt um die Wurzel zu legen. Das folgende Ablegen des Blattes ist ein normaler Transporteinsatz.

Schwerpunktslage

Die günstigste Lage des Blattschwerpunktes wäre, von oben gesehen, genau zwischen den Seilangriffspunkten. Dies ist bei eingefädelten Bolzen nicht möglich. Am nächsten kommt der Schwerpunkt der vorher genannten Position, wenn die Endkante des Blattes vom Turm weg nach vorne zeigt. Er liegt dann etwa 250mm vor dem vorderen Bolzen.

Lasten

Die Windlasten die durch das Rotorblatt entstehen, sind die gleichen wie im Abschnitt 4.4.1. Das Blatt hängt in der oberen Position jedoch nur an der Wurzel. Dadurch liegt der Schwerpunkt des Blattes unter dem Aufhängepunkt. Es entsteht ein Drehmoment, das Auslenkungen die durch Windlasten hervorgerufen werden, entgegenwirkt und das Blatt so stabilisiert.

Das maximale Auftriebsmoment und das Gewichtsmoment bezüglich der Wurzel bei 14m/s Wind:

$$M_{A,W,max} = 631,3kNm$$

$$M_{G,W} = 16,5t \cdot 9,81kgm/s^2 \cdot 16,5m = 2671kNm$$

Diese Momente gelten für den Fall, dass das Blatt Waagrecht hängt. Das Gewichtsmoment ist größer als das Auftriebsmoment. Das Blatt hängt also in den Seilen.

Das Blatt wird an der äußeren Transportverstärkung von einem Kran geführt. Dieser kann die Blattspitze durch Drehung vom Turm wegbewegen um eine bessere Ablageposition zu erhalten.

4.5. Bewertung der Lösungsvorschläge

4.5.1. Bewertungskriterien

Kriterien Kurzbeschreibung

Die Gewichtung der gewählten Bewertungskriterien und die Bewertung der Lösungen ist demzufolge nicht objektiv. Sie soll dazu dienen anstelle vom reinen „Bauchgefühl“ eine auf relevanten Kategorien basierende Entscheidungshilfe zu erhalten.

- Geschätzte Masse relativ zu den anderen Lösungen: Je schwerer die Vorrichtung desto schlechter wird ihre Bewertung.
- Anzahl Komponenten: Weniger Komponenten machen das System weniger Komplex, das bedeutet eine bessere Wertung.
- Kraneinsatz: Je weniger Krane benötigt werden desto näher ist die Lösung dem Idealziel der Aufgabenstellung.
- Zeitbedarf Blatt(de)montage.
- Zeitbedarf Vorrichtungsaufbau und Abbau.
- Komplexität Vorrichtungsaufbau.
- Energiebedarf (elektrisch, hydraulisch,, u.Ä.).
- Relative Herstellungskosten. Die Herstellungskosten sind wegen der geringen zu erwartenden Stückzahlen weniger entscheidend für das Ziel, sind aber nicht unwesentlich.

- Relative Entwicklungskosten. Je größer der technische Aufwand wird, desto größer werden auch die Entwicklungskosten. Wie bei den Herstellungskosten ist die Gewichtung aber schwächer als bei anderen Kriterien.
- Relative Betriebs- und Wartungskosten.
- Realisierung der Funktion Greifen/Freigeben.
- Realisierung der Funktion Führen.
- Realisierung der Funktion Einfädeln.
- Realisierung der Funktion Blatt halten.
- Realisierung der Funktion Drehen.
- Realisierung der Funktion Aufnehmen und Ablegen am Boden.

4.5.2. Auswahl eines Vorschlags

Für die drei vorgestellten Lösungen wird eine Bewertung nach einem Wertigkeitsverfahren durchgeführt. Dazu werden Bewertungskriterien aufgestellt. Diese folgen aus der Anforderungsliste. Zunächst werden die Lösungsvorschläge für jedes Kriterium stichwortartig bewertet (siehe Tabelle 4.2).

Jedem Kriterium wird eine Gewichtung g_i zugeordnet. Für Jede Lösung wird für jedes Kriterium ein Punktwert P_{ij} mit aufsteigendem Wert von 0 ... 4 vergeben. Die Wertigkeit wird durch Gleichung 4.16 quantifiziert.

$$W_j = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{ij} \cdot g_i)}{P_{max} * \sum_{i=1}^n g_i} \quad (4.16)$$

W_j : Wertigkeit von Lösung j

g_i : Gewichtung von Kriterium i

$P_{ij} = 0 \dots 4$: Punktwert von Kriterium i, Lösung j

$P_{max} = 4$: Maximal zu vergebende Punktzahl

Das Bewertungsverfahren bevorzugt die einfache Lösung des an drei Seilen hängenden Blattes. Allerdings ist keines der Verfahren als optimale Lösung anzusehen, die ermittelten Wertigkeiten sind recht gering.

Tabelle 4.2.: Gegenüberstellung der Lösungen

Kriterium	Lösung A	Lösung B	Lösung C
Relative Masse	relativ Schwer	schwerste Lösung wegen Gegengewicht	leichteste Lösung
Anzahl Komponenten Kraneinsatz	viele Baugruppen voraus. 2 Krane	viele Baugruppen voraus. 2 Krane	drei Baugruppen in Nabe + Bolzen 2 Krane
rel. Herstellungskosten	viele Maschinenteile	viele Maschinenteile, sehr große Motore zum Drehen	3 Elemente in der Nabe + spez. Bolzen
rel. Investitionskosten	sehr komplex	sehr komplex	an sich einfach
Zeitbedarf Auf-/Abbau	Teile an Gondel zu Montieren, Aufbau Greifer	Teile an Gondel zu Montieren, Aufbau Greifer	Teile in Nabe einbauen
Komplexität Vorrichtungsaufl.	mehrere Unterkomponenten	voluminöse Konstruktion	verfügbarer Platz in Nabe begrenzt
Energiebedarf	Drehen muss hohes Moment überwinden	Drehen muss hohes Moment überwinden	drei Seilwinden + Krane
Betriebs- und Wartungskosten	sehr komplex	sehr komplex	Lediglich passive Teile in der Nabe, Seilwinden sind Standardteile
Funktion Greifen/Freigeben	sicherer Griff	sicherer Griff	Einsatz spezieller Bolzen erforderlich
Funktion Führen	turm- und seilgeführt	nur seilgeführt	kran- und seilgeführt
Funktion Einfädeln	Lineargeführt	Linearführung + Hub	Einfädeln über Zentrierbolzen
Funktion Halten	sicherer Griff	sicherer Griff	hängt stabil senkrecht
Funktion Drehen	sicher, aber kann hohe Antriebs-	Kettenzug kann hohe Antriebs- momente erfordern	nur durch Bewegungs- kombination möglich
Funktion Ablegen/Aufnehmen	kann nur schwer vom Turm weggezogen werden	Konstruktion sich selbst im Weg	wird in turmnähe heruntergelassen, wenige Teile im weg

Tabelle 4.3.: Bewertung der Lösungsvorschläge

Kriterium	Gewichtung (1 ... 5)	Lösung A Greifer turmgeführt	Lösung B Greifer hängend	Lösung C An Bolzen hängend
Relative Masse	2	3	2	4
Anzahl Komponenten	3	2	3	4
Kraneinsatz	3	3	3	4
rel. Herstellungskosten	1	1	2	4
rel. Investitionskosten	1	1	2	4
Zeitbedarf Auf-/Abbau	3	2	2	4
Komplexität Vorrichtungsaufb.	4	2	3	2
Energiebedarf	3	2	2	4
Betriebs- und Wartungskosten	4	1	2	4
Funktion Greifen/Freigeben	4	4	3	3
Funktion Führen	4	3	3	3
Funktion Einfädeln	4	2	2	1
Funktion Halten	4	4	4	4
Funktion Drehen	4	3	3	3
Funktion Ablegen/Aufnehmen	4	2	1	3
Wertigkeit		0,620	0,635	0,79

5. Weitere Bearbeitung

An dieser Stelle werde ich die Lösung C wählen. Sie besticht durch ihre Einfachheit. Problematisch bei dieser Lösung ist der Einbau in die Nabe der M5000-116er Anlage. Die folgende Ausarbeitung ist daher als weitere Ideensammlung und prinzipielle Lösung anzusehen, da ein Einbau in die bestehende Anlage nicht realistisch ist.

In diesem Kapitel soll die beste Lösung aus Kapitel 4 weiter bearbeitet werden. Es wird eine weitere Vorauslegung wichtiger Teile vorgenommen. Der Betriebsablauf wird detailliert und auf mögliche Störfälle eingegangen.

Einige Elemente wurden bereits in der Vorbetrachtung während der Lösungsfindung behandelt. Dazu gehören aerodynamischen Lasten und eine Darstellung des Ablaufs einer Blattdemontage.

5.1. Blatttauschverfahren BTV

5.1.1. Übersicht

Das favorisierte Blatttauschverfahren hat für den Anwendungsfall der AREVA M5000-116 WEA das wesentliche Problem, dass die in der Nabe zu montierenden Teile nicht befestigt werden können, ohne den ohnehin schon beengten Raum stark einzuschränken. Möchte man davon absehen, die Nabe nachträglich mit Anschraubmöglichkeiten zu versehen, bleiben nur Klemmkräfte zum Halten von Seilrollen und Ausleger. Die Umgebungsbedingungen im Inneren der Nabe sind dadurch gekennzeichnet, dass die meisten Oberflächen einen Fettfilm aufweisen. Dies sorgt dafür, dass der Haftreibungskoeffizient sinkt. Literaturwerte für eine geschmierte Stahl auf Stahl Reibung liegen bei $f = 0,1$, für Gleitreibung kann dies um den Faktor 10 kleiner ausfallen.

Zusätzliche Ansichten

Abbildung 5.1 ist eine Ergänzung zu Abbildung 4.20. Die Abbildung zeigt die Ansicht von schräg hinten in die Nabe. Das Konzept sieht vor, dass der Träger ein U-Profil aufweist. Zwischen den Stegen des U sind die Umlenkrollen für das vordere der Seile

S1 angebracht. Auf den Außenseiten des Profils sind im inneren der Nabe gelenkig gelagerte Seilflaschen angebracht. Sie lenken die Seile der hinteren beiden Befestigungsbolzen so um, dass sie am Ausleger entlang aus der Nabe herausgeführt werden können.

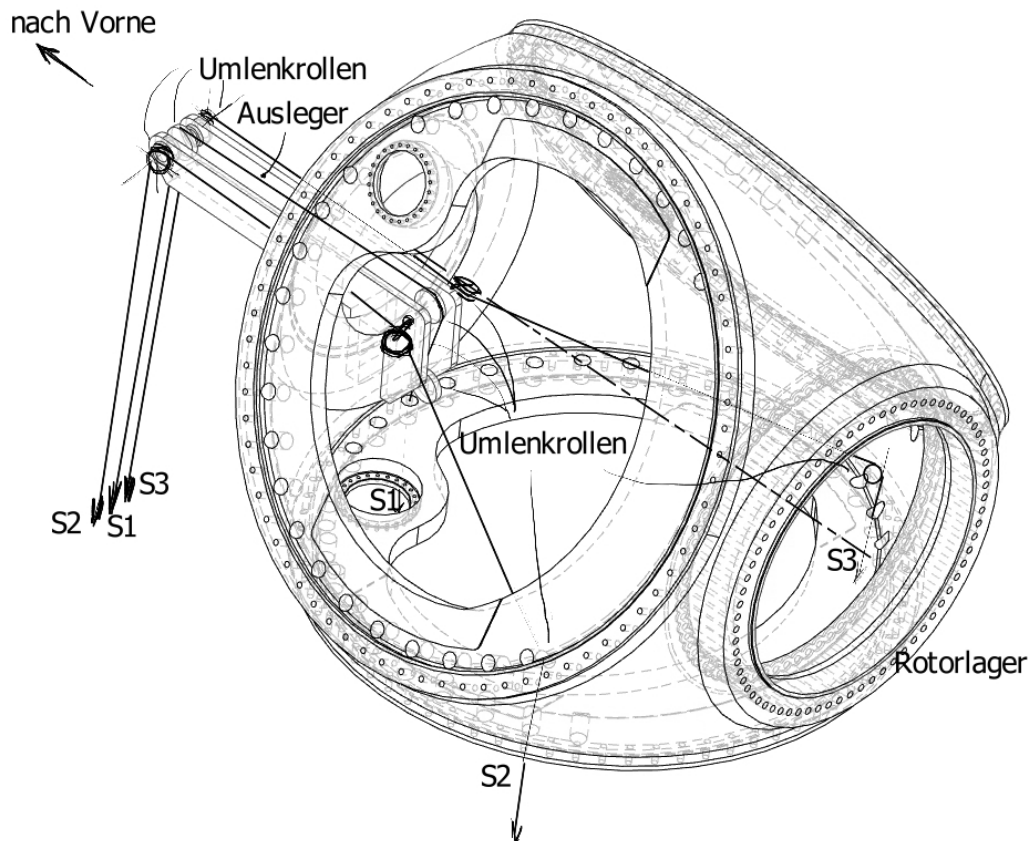


Abbildung 5.1.: Rückansicht der Nabe mit Ausleger und Umlenkrollen

Eigenschaften

Die zu beachtende Gesamt-Seilkraft wird in 5.1.2 bestimmt.

Der Ausleger hat eine Länge von 2,5m. Im Vergleich dazu ist bei Lösungsvariante B ein Ausleger von etwa 10m Länge erforderlich um die Vorrichtung in ihrem Gesamtschwerpunkt transportieren zu können.

Im Inneren der Nabe werden lediglich drei Teile verbaut: der Ausleger und zwei weitere Umlenkrollen.

Die gesamte Haltevorrichtung besteht somit aus mehreren kompakten Einzelteilen. Dadurch ist sie mit Containern transportierbar.

5.1.2. Teilsysteme

Aufnahme- und Hubvorrichtung

Die Seile werden über Umlenkrollen aus dem Inneren der Nabe durch die vordere Einstiegsöffnung herausgeführt. Am Boden stehen drei Seilwinden mit denen jedes Seil einzeln kontrolliert werden.

Moderne Kunststoff-Seile anstelle herkömmlicher Drahtseile für den Kranhub bieten sich hier an. Sie sind weicher als Drahtseile, haben so geringere Biegeradien und verursachen weniger Verschleiß an Rollen und Führungen. Des weiteren recken sich Kunststoffseile weniger als Drahtseile [10]. Ein 16mm starkes Seil der Bauart KZ™ 100 des Herstellers Dyneema hat eine statische Nennlast von 21.4t. Damit würde ein Seil reichen das Blatt zu tragen. Unter Berücksichtigung des Stoßfaktors von 2.5 für Offshoreoperationen muss eine Seilkonstruktion $16,5t \cdot 2,5 = 41,25t$ halten. Berücksichtigt man für die Seilenden den für Kurzspleiße üblichen Minderungsfaktor von 0,85, so tragen drei Seile der genannten Bauart 54,57t. Dies entspricht einem Sicherheitsfaktor von 1.32, zusätzlich zu dem Stoßfaktor von 2,5 und dem Sicherheitsfaktor von 5 aus den Herstellerangaben.

In Abbildung 5.2 ist ein Entwurf einer Presshülse dargestellt, der als Passschraube in die Blattwurzel anstelle normaler Dehnbolzen eingeschraubt wird. Das Problem wird sein, dass Hülse in den Querbolzen eingeschraubt werden muss. Dazu sind Angriffsflächen für einen Schlüssel vorgesehen. der Entstehende Absatz steht über den Flansch heraus. Wenn das Blatt abgesenkt und gedreht wird, wird zum Einen das Seil stark gebogen, zum Anderen wird der Bolzen dort auf Scherung belastet.

Fädelsystem

Das Einfädeln des Blattes geschieht durch die Führung mit den Hubseilen durch drei der Pitchlagerbohrungen. Zusätzlich können Zentrierbolzen verwendet werden. Diese sind etwas länger ausgeführt als die normalen Dehnbolzen. Beim Ein- und Ausfädeln ist darauf zu achten das die Fädellänge wesentlich länger ist als der Überstand der Dehnbolzen. Bis das Blatt die Nabenverkleidung passiert hat müssen etwa 2m zurückgelegt werden. Das heißt, dass das Blatt bis dahin nur wenig kippen darf.

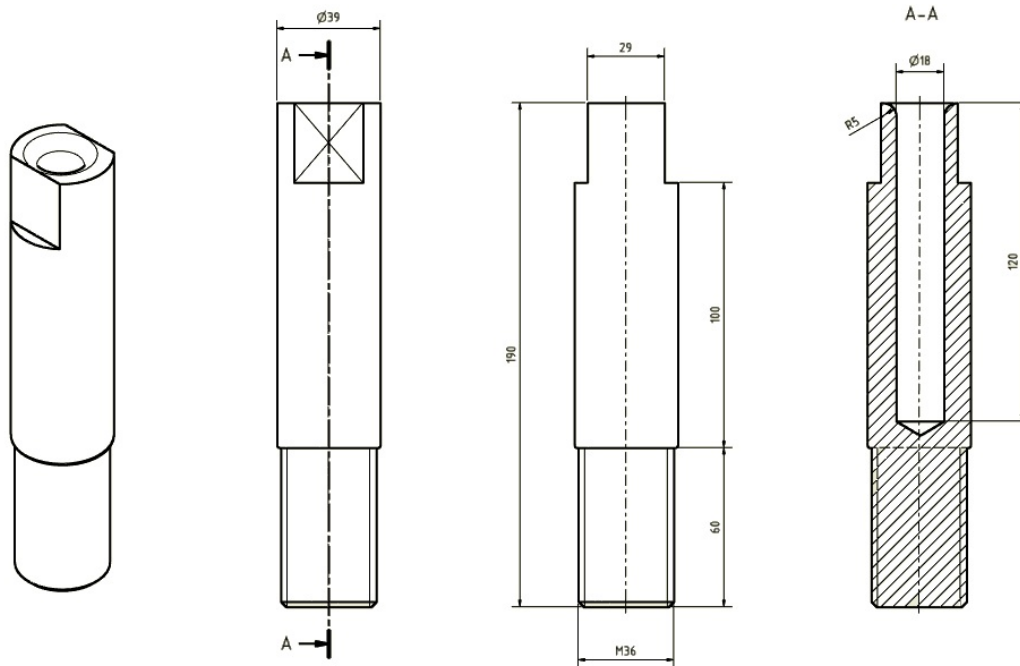


Abbildung 5.2.: Presshülse als Seilende

Mechanische Belastung der Anlage

Momente und Kräfte durch Windlasten treten auch im Betrieb an der Anlage auf. Die Anlagenteile und Rotorblätter sind unter Berücksichtigung extremer Lastfälle, die die hier zugelassenen Umweltbedingungen überschreiten, ausgelegt worden.

Das Rotorblatt wurde in einem statischen Blatttest höheren Lasten ausgesetzt als die ungünstigste Kalkulation vorsieht.

Im Kapitel zuvor wurde festgestellt, dass die durch Windlasten verursachten Kräfte zwar kleiner sind als diejenigen aufgrund der Blattmasse, bei der Betrachtung der erzeugten Momente jenes durch den aerodynamischen wesentlich größer ist als Massenmomente.

Das für das Rotorblatt selbst stellt dieses Verfahren - abgesehen von den Klemmkraften - den typischen Einsatzfall des Blatttransports dar. In den Vorbetrachtungen in Kapitel 4 wurde bereits festgestellt, dass die dadurch verursachten Belastungen weit unter dem in der Anforderungsliste angegebenen Grenzwerten für Flächenpressung liegen.

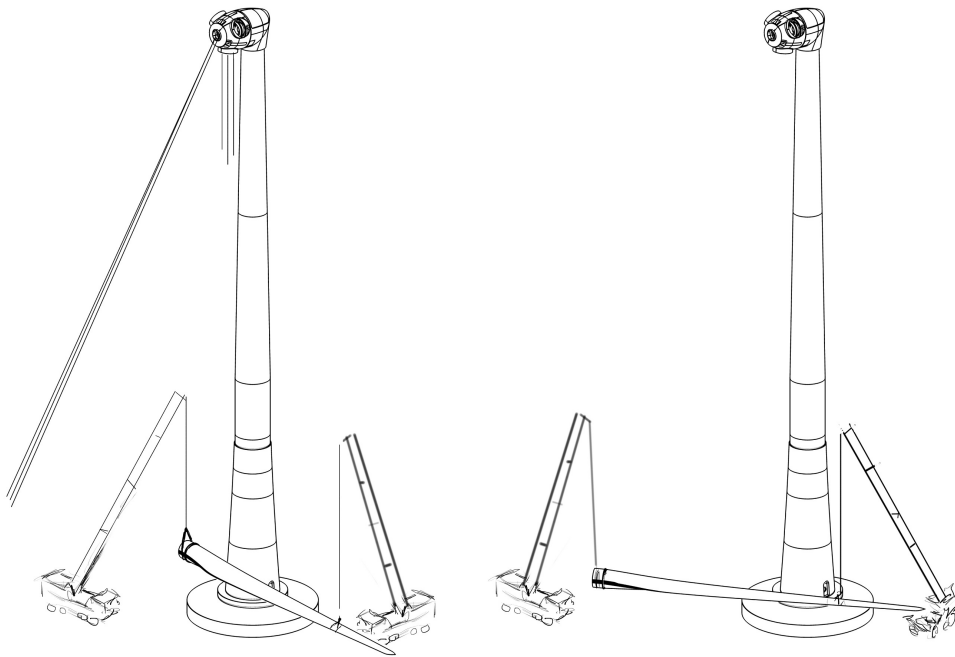


Abbildung 5.3.: Abtransport eines Blattes

5.2. Betriebsablauf

5.2.1. Drehen des Blattes

Das Drehen des Blattes erfolgt durch anheben der Blattspitze mit einem Mobilkran. Dies passiert sobald der Tip niedrig genug hängt um die Kranschere benutzen zu können (siehe auch Abb. 4.22). Hängt das Blatt horizontal, übernimmt ein zweiter Kran das Blatt an der Wurzel. Beide Zusammen manövrieren das Blatt in ein Lagergestell (Abb. 5.3).

5.2.2. Verhalten bei möglichen Störfällen

Der wichtigste Störfall ist ein Ausfall der Energieversorgung. Dies kann an mehreren Stellen passieren.

1. Am Boden: Ausfall der Hubseilwinde
2. An einer Umlenkrolle: Herauslaufen eines Seils aus den Rollen

3. An der Greifvorrichtung: Ausfall der Drehvorrichtung
4. An der Greifvorrichtung: Ausfall der Greifvorrichtung selbst

Die Seilwinden am Boden sollten gegen einen Stromausfall gesichert sein, um beispielsweise ein Abspulen des Seils und damit den Absturz der Last zu verhindern. Handelsübliche Seilwinden haben entsprechende Sicherungen. Die Seilwinden müssen fest am Boden stehen.

All dies läuft darauf hinaus, dass das Blatt auch bei Ausfall eines Seils gehalten werden muss.

Als schwerwiegender Störfall muss, wie bei auch bei Kranen, der Absturz einer Last angesehen werden. Im Fall der BTV kann dies geschehen wenn

1. Haltebolzen versagen,
2. die Seile aus den Haltebolzen gezogen werden, oder
3. die Hubseile zerstört werden.

Der erste Fall kann auftreten, wenn beim Drehen des Blattes die Querbeanspruchung zu groß wird, oder wenn die Verschraubung versagt. Letzteres ist unwahrscheinlich. Die Seile müssen dünn sein, um durch die Pitchlagerbohrungen geführt werden zu können. Die Verbindung von Bolzen mit Kunststoffseilen kann problematisch sein. Drahtseile werden darin eingegossen, bei Kunststoff nicht möglich.

5.2.3. Umweltbedingungen

Regen

Der Einsatz des Verfahrens bei Regen sollte möglich sein, sei es nur um den (De-)Montagevorgang sicher beenden oder abbrechen zu können. Der Einsatz bei Regen wird eine IP Schutzklasse für Mechanik und Steuerung erfordern. Sinnvoll erscheint hier eine Mindestklassifizierung von IP55. Dies würde einen Staubschutz und Schutz vor Strahlwasser bedeuten.

Temperatur

Der Einsatz in auf Nabenhöhe an einer Anlage kann bedeuten, dass die Umgebungstemperatur gering wird, vor allem wenn der Einsatz in Wintermonaten erfolgen soll. Eine weitere Auslegung muss berücksichtigen, dass die verwendeten Betriebsmittel (z.B.

Öle und Fette) für Temperaturen, wie sie in den Umweltraumbedingungen aufgeführt wurden, geeignet sind.

Wind

In der Vorauslegung ein Kapitel zuvor wurde mit einfachen Rechnungen versucht ungünstige Windverhältnisse zu berücksichtigen, wie z.B. ein quer angeströmtes Blatt. Vorzugsweise sollte der Betrieb der Vorrichtung aber bei konstanten Windbedingungen stattfinden.

6. Ergebnis und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Vorschlag für ein Verfahren gemacht mit dem der Tausch, beziehungsweise die (De-)Montage eines Rotorblattes ohne den Einsatz aufwendiger Krantechnik ermöglicht werden soll.

Es wurde der Stand der Technik gezeigt. Dabei wurde festgestellt, dass bisher keine Systeme im Einsatz sind mit denen die (De-)Montage von Rotorblättern einer Windenergieanlage ohne Großkrane durchgeführt wird.

Für mehrere wichtige Teilfunktionen des gewünschten Verfahrens wurden Lösungsvorschläge gemacht und durch Kombination mehrere Gesamtlösungen erarbeitet. Für diese wurden Abschätzungen zu Belastungen von Anlagenteilen und Rotorblättern durchgeführt. In einer Bewertung wurde die von den gefundenen am besten erscheinende Lösung ermittelt.

Der voraussichtliche Verfahrensablauf wurde dargestellt und einige mögliche Störfälle und Umweltbedingungen angerissen. Dabei wurde der Punkt der Blattaufnahme am Boden, beziehungsweise die Abgabe des Blattes am Boden, noch nicht zufriedenstellend bearbeitet. Es ist besser das Blatt weiter vom Turm wegzuziehen wenn es in Bodennähe ist. Bei der vorgestellten Lösung werden dafür noch große Kräfte gebraucht. Dieser Vorgang muss mit dem Blatthub koordiniert werden.

Ein weiterer Punkt, der ungeklärt blieb, ist, ob der in der Nabe zu montierende Ausleger mit dem Bordkran dort installiert werden kann. Sollte das nicht der Fall sein, gibt es die Möglichkeit mit einem hohen Kran, der dann nur eine geringe Nennlast bieten muss, die Montage vorzunehmen. Dies geht etwas der Aufgabenstellung zuwider, keine aufwendige Krantechnik zu verwenden. Andererseits ist ein solcher Kran immer noch leichter verfügbar als schwerere Varianten. Derselbe Kran kann auch zur Handhabung des Blattes in Bodennähe benutzt werden.

Die Blatttauschvorrichtung erscheint dennoch als ein sehr komplexes System. Der favorisierte Vorschlag aus der Lösungsfindung ist das einfachste der gefundenen Systeme und sollte bei Neuentwicklungen in Betracht gezogen werden. Für den Einsatz an der M5000-116er WEA - welche die Grundlage der Arbeit war, ist der Einbau von zumindest zwei der Umlenkrollen problematisch, da keine Anschlagpunkte vorgesehen sind. Ebenso nicht berücksichtigt wurden zusätzliche Einbauteile in der Nabe. Auch der

Ausleger der die Seile aus der Nabe ins Freie führen soll müsste entweder in der Nabe verkeilt werden, was ihn sehr groß und damit schwer montierbar macht, oder über Klemmkräfte gehalten werden.

Obwohl das vorgeschlagene Verfahren in der Theorie funktioniert, bedarf eine Fortführung der Arbeit zu einer einsatzfähigen Lösung mehrerer Revisionen an den hier vorgestellten Inhalten. Zum einen sollte die einfache Anforderungsliste die für die Vorauslegung benutzt wurde, durch detailliertere Lasten- und Pflichtenhefte ergänzt werden.

Dies bedeutet, dass für das vorgestellte System eine erneute Lösungsfindung stattfinden muss um Details zu gestalten.

Die Umweltverhältnisse an realen Windenergieanlagen sind wesentlich komplexer als hier angenommen. Verschiedene und insbesondere instationäre Windbedingungen müssen berücksichtigt werden.

Besondere Aufmerksamkeit sollte die zeitweise Montage von Vorrichtungsteilen an der Anlagenstruktur finden. Deren Verbindung wurde in dieser Arbeit nicht geklärt.

A. Tabellen

Tabelle A.1.: Installierte WEA in Deutschland [21]

Jahr [-]	Anzahl zugebaut [-]	Anzahl kummuliert [-]
2000	1495	9359
2001	2079	11438
2002	2328	13759
2003	1703	15387
2004	1201	16543
2005	1049	17574
2006	1208	18685
2007	883	19460
2008	866	20301
2009	952	21165
2010	754	21607
2011	895	22297
2012	998	23030
2013	1154	23645

Tabelle A.2.: Installierte WEA-Leistung in Deutschland [21]

Jahr [-]	Zubau [-]	Leistung [MW]
2000	1665	6095
2001	2659	8754
2002	3247	12001
2003	2645	14609
2004	2037	16629
2005	1808	18428
2006	2233	20621,86
2007	1667	22247
2008	1665	23903
2009	1917	25777
2010	1551	27190
2011	2085	29060
2012	2415,6	30989,33
2013	2998,41	33729,83

Tabelle A.3.: Aerodynamische Auftriebs- und Widerstandskräfte des 56,5m-Blattes für eine Anströmgeschwindigkeit von 1m/s senkrecht zur Blattlängsachse

Pitchwinkel [°]	Auftriebskraft F_A [kN]	Auftriebszentr. $L_{\text{Blatt,A}}$ [m]	Luftwiderstandsk. F_W [kN]	Widerstandsz. $L_{\text{Blatt,W}}$ [m]
0	-0,0384	11,533	0,0118	8,216
7,5	0,0381	45,044	0,0074	6,054
15	0,1194	28,749	0,0094	15,253
22,5	0,1409	25,529	0,0186	23,087
30	0,1296	24,94	0,0321	23,554
37,5	0,1189	24,363	0,049	24,572
45	0,1111	24,19	0,0683	23,873
52,5	0,1025	23,807	0,086	24,284
60	0,0949	23,617	0,1032	23,892
67,5	0,0832	23,023	0,1181	24,07
75	0,0694	22,897	0,1306	23,75
82,5	0,0529	21,671	0,1406	23,816
90	0,0352	20,997	0,1479	23,526
97,5	0,0165	14,893	0,1511	23,397
105	-0,0024	72,679	0,151	23,227
112,5	-0,0206	31,218	0,1465	22,973
120	-0,0375	26,862	0,1392	22,854
127,5	-0,0521	26,418	0,1285	22,493
135	-0,0640	25,385	0,1155	22,437
142,5	-0,0723	25,393	0,1003	21,924
150	-0,0773	25,09	0,0843	21,941
157,5	-0,0823	25,396	0,0703	21,311
165	-0,0860	25,168	0,0554	21,074
172,5	-0,0814	24,134	0,0377	17,413
180	-0,0645	22,241	0,0185	11,42
187,5	-0,0122	-22,552	0,0102	8,359
195	0,0480	33,938	0,0127	19,593

Fortsetzung auf nächster Seite

Aerodynamische Auftriebs- und Widerstandskräfte des 56,5m-Blattes für eine Anströmgeschwindigkeit von 1m/s senkrecht zur Blattlängsachse

Pitchwinkel [°]	Auftriebskraft F_A [kN]	Auftriebszentr. $L_{\text{Blatt,A}}$ [m]	Luftwiderstandsk. F_W [kN]	Widerstandsz. $L_{\text{Blatt,W}}$ [m]
202,5	0,0771	26,453	0,0284	26,743
210	0,0839	25,282	0,045	24,832
217,5	0,0841	25,045	0,059	24,688
225	0,0832	24,582	0,0721	24,253
232,5	0,0783	24,021	0,0864	24,529
240	0,0722	23,698	0,1011	24,13
247,5	0,0620	22,723	0,1144	24,129
255	0,0498	22,316	0,1262	23,745
262,5	0,0345	20,137	0,1347	23,708
270	0,0181	17,563	0,1411	23,465
277,5	0,0003	-521,54	0,1435	23,347
285	-0,0176	31,368	0,1432	23,185
292,5	-0,0353	28,665	0,1391	22,956
300	-0,0522	26,516	0,1329	22,889
307,5	-0,0674	26,358	0,123	22,554
315	-0,0808	25,526	0,1115	22,438
322,5	-0,0900	25,459	0,0959	21,747
330	-0,0960	24,973	0,0793	21,442
337,5	-0,0949	24,559	0,0599	19,671
345	-0,0885	24,683	0,0393	18,131
352,5	-0,0854	24,266	0,0213	11,944
360	-0,0384	11,533	0,0118	8,216

Tabelle A.4.: Aerodynamische Auftriebs- und Widerstandsmomente des 56,5m-Blattes für eine Anströmgeschwindigkeit von 1m/s senkrecht zur Blattlängsachse

Pitchwinkel [°]	Auftriebsmoment $M_{A,S}$ [kN]	Widerstandsmoment $M_{W,S}$ [kN]
0	-0,1907	0.0977
7,5	-1,0875	0.0773
15	-1,4625	0.0117
22,5	-1,2721	-0.1225
30	-1,0930	-0.2264
37,5	-0,9349	-0.3955
45	-0,8540	-0.5035
52,5	-0,7489	-0.6694
60	-0,6754	-0.7628
67,5	-0,5427	-0.8940
75	-0,4439	-0.9468
82,5	-0,2735	-1.0286
90	-0,1582	-1.0391
97,5	0,0265	-1.0421
105	0,1348	-1.0157
112,5	0,3031	-0.9482
120	0,3885	-0.8844
127,5	0,5167	-0.7701
135	0,5686	-0.6857
142,5	0,6429	-0.5440
150	0,6640	-0.4586
157,5	0,7321	-0.3382
165	0,7454	-0.2533
172,5	0,6214	-0.0344
180	0,3702	0.0939
187,5	-0,4764	0.0830
195	-0,8370	-0.0393

Fortsetzung auf nächster Seite

Aerodynamische Auftriebs- und Widerstandsmomente des 56,5m-Blattes für eine Anströmgeschwindigkeit von 1m/s senkrecht zur Blattlängsachse

Pitchwinkel [°]	Auftriebsmoment $M_{A,S}$ [kN]	Widerstandsmoment $M_{W,S}$ [kN]
202,5	-0,7673	-0.2909
210	-0,7368	-0.3749
217,5	-0,7186	-0.4831
225	-0,6724	-0.5590
232,5	-0,5888	-0.6937
240	-0,5196	-0.7713
247,5	-0,3858	-0.8727
255	-0,2896	-0.9143
262,5	-0,1254	-0.9709
270	-0,0192	-0.9828
277,5	0,1614	-0.9826
285	0,2616	-0.9573
292,5	0,4294	-0.8980
300	0,5228	-0.8491
307,5	0,6644	-0.7446
315	0,7293	-0.6621
322,5	0,8063	-0.5031
330	0,8134	-0.3919
337,5	0,7647	-0.1899
345	0,7241	-0.0641
352,5	0,6632	0.0970
360	-0,1907	0.0978

B. Datenblätter

12
STRAND
CONSTRUCTION

Class II

KZ™ 100

**THE FIRST SYNTHETIC LINE DESIGNED SPECIFICALLY FOR MOBILE CRANES:
A lightweight, safe, and reliable alternative to steel wire rope.**

FEATURES & BENEFITS:

- > 80% lighter than wire
- > Easy handling/reaving and installation
- > Reduces number of change outs due to elimination of kinking, bird caging, or damage from diving
- > Torque-neutral construction eliminates load spin and cabling
- > Corrosion resistant—no rusting, no lubing
- > Reduces risk of hand injury from broken wires
- > Reduced wear on drums, sheaves
- > Standardizes main and auxiliary hoist to one rope
- > Same load pull and load chart but with 5:1 safety factor

Samson has leveraged fiber, coating, and rope construction technology from multiple industries it serves to create KZ™100. Designed specifically for use on mobile cranes, KZ™100 hoist rope features high strength-to-weight ratio, bend fatigue durability, and robust spooling capabilities.

The combination of high-performance synthetic fibers provides strength similar to wire rope with over 80% in weight reduction. The high strength of these high-performance fibers allows the rope to meet the maximum line pull requirements with a 5:1 safety factor. A proprietary coating has been added to KZ™100 to improve rope performance in cyclic bend over sheave applications inherent on mobile cranes.

The physical structure of KZ™100 also contributes to its performance characteristics. The rope construction provides a firm cross section that enables efficient multi-layer spooling, prevents load spin, bird caging, and permanent damage due to improper spooling.

The result is a crane hoist line that is easy and safe to handle/reeve, more durable for spooling, and can reduce weight in the overall system.



Nominal Diameter		Approximate Weight		ISO 2307 Strength*	
MILLIMETERS	INCHES	KG/METER	POUNDS/FOOT	METRIC TONS	POUNDS
16 mm	5/8"	0.17 kg	0.11 lb	21.4 t	47,200 lb
18 mm	3/4"	0.24 kg	0.16 lb	28.9 t	63,700 lb
20 mm	13/16"	0.27 kg	0.18 lb	32.6 t	71,900 lb
22 mm	7/8"	0.32 kg	0.22 lb	38.1 t	84,000 lb
25 mm	1"	0.42 kg	0.29 lb	49.3 t	109,000 lb
28 mm	1-1/8"	0.54 kg	0.36 lb	60.2 t	133,000 lb

*Unspliced strength.
Max permissible line pull is calculated with a 5:1 safety factor

The product name KZ™100 was chosen to honor Karim Ziyad. He was the pioneering Manitowoc engineer that collaborated with Samson to develop the use of synthetic hoist ropes. Karim passed away in a bicycling accident in 2013. His keen intellect and honest friendship will be fondly remembered and greatly missed.

SPECIFICATIONS

FIBER (CORE/COVER): Polyester (Control Core) / High Modulus Blend

SPECIFIC GRAVITY: 1.05

COLOR: Orange with a black longitudinal line

ELASTIC ELONGATION PERCENTAGE

At % of break strength

10% 0.9%

20% 1.3%

30% 1.8%

SPLICE/CLASS:

Product Specific Class II



Dyneema® is a registered trademark of Royal DSM N.V. Dyneema is DSM's high-performance polyethylene product.

DOCUMENT DS_KZ100_Trials_Apr2014.pdf

© 2014 Samson Rope Technologies, Inc. SWD #108028 4/2014

2090 Thornton Street, Ferndale, WA 98248 USA
Tel 01.360.384.4669 | Fax 01.360.384.0572
www.SamsonRope.com



Literaturverzeichnis

- [1] *BGR500, Betreiben von Arbeitsmitteln*
- [2] *DE102008053404A1, Verfahren zum Transport eines Rotorblattes einer Windenergieanlage und einer Transportvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.* – Patent
- [3] *Einzelblattmontage offshore.* http://www.dongenergy.com/SiteCollectionImages/Wind/walney/NL6_turbineinstallation2.jpg
- [4] *Ematec Blatttraverse.* http://www.jensen-media.de/news/wp-content/uploads/2013/04/ematec_rbt_01.jpg. – Zugriff: 2014-06-04
- [5] *EP 2224126 A2, Verfahren zur Handhabung des Rotorblatts einer Windenergieanlage in eine vertikale Position.* – Patent
- [6] *Foto Einzelblattmontage.* http://www.ah-industries.com/windsolutions/sitesolutions/products/single_blade_installation/Pages/single_blade_installation.aspx. – Zugriff: 2014-06-04
- [7] *Foto zur Montage eines Rotorsterns im Testfeld Alpha Ventus.* <http://www.bine.info/en/publications/publikation/rave-forschen-am-offshore-testfeld/anlagentechnik-und-komponenten/>. – Zugriff: 2014-06-05
- [8] *Liftra.* <http://en.wikipedia.org/wiki/Liftra>. – Zugriff: 2014-06-04
- [9] *Montage von Gondel und Rotor für AEOLUS II (1990).* <http://www.pb-plus.de/f6u1.html>. – Zugriff 2014-06-04
- [10] *Samson Rope KZ100 Datenblatt.* http://www.samsonrope.com/Documents/DS_KZ100_WEB.pdf. – Zugriff: 2014-07-20
- [11] *VDI 2221, Ausgabedatum: Mai 1993, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte; Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf*
- [12] *Efficient Wind Farm Performance Analysis.* Wilhelmshaven, 2004. – Proceedings of German Wind Energy Conference 2004
- [13] *DEUTSCHE WINDGUARD GMBH: Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland.* Varel, Detuschland, November 2013. – Forschungsbericht

- [14] AREVA Blades GmbH. 2014
- [15] ALBERS, A.: O&M Cost Modelling, Technical Losses and Associated Uncertainties / Deutsche Windguard Consulting GmbH. – Forschungsbericht
- [16] BERG IDL GMBH: *Windenergie - Wind Lift Tower*. <http://berg-idl.de/de/windenergie/>. – Zugriff: 2014-04-10
- [17] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: *Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) vom 12. Mai 1993 (BGBl. I S. 704), die zuletzt durch Artikel 19 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist*. Mai 1993. – 9. ProdSV, Maschinenverordnung
- [18] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: *Zwölfte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Aufzugsverordnung) vom 17. Juni 1998 (BGBl. I S. 1393), die zuletzt durch Artikel 22 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist*. Juni 1998. – 12. ProdSV, Aufzugsverordnung
- [19] BUNDESVERBAND WINDENERGIE: *Technik*. www.windenergie.de/Infocenter/Technik. – Zugriff: 2014-06-05
- [20] BUNDESVERBAND WINDENERGIE: *Wind Energy Market 2013 / Bundesverband Windenergie*. 2013. – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-942579148
- [21] BUNDESVERBAND WINDENERGIE: *Statistiken*. www.windenergie.de/Infocenter/Statistiken/Deutschland. Version:2013-12-31
- [22] DE, B.I. ; GLUBRECHT, H.L. ; HOPPMAN, G.: *Verfahren zum Ausführen von Arbeiten an einer Windenergieanlage*. <https://www.google.com/patents/EP2365211A1?cl=de>. Version:September 14 2011. – EP Patent App. EP20,100,002,383
- [23] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: *Maschinenrichtlinie Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung)*. Mai 2006. – Maschinenrichtlinie 2006/42/EG
- [24] GASCH, Robert ; TWELE, Jochen: *Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung, und Betrieb*. 5. Auflage. Wiesbaden : B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH
- [25] INSTITUT FÜR INTEGRIERTE PRODUKTION HANNOVER (IPH): *Pressemitteilung vom 2. April 2014*

- [26] K. HAMANN, M. W. R. Walker W. R. Walker: *Availability Trends Observed at Operational Wind Farms*. Brüssel, 2008. – Proceedings of EWEC 2008
- [27] LIEBHERR-WERK EHINGEN GMBH: *Windeinflüsse bei Kranbetrieb*. 3. Auflage. Ehingen/Donau, 2012. – Schulungsunterlage
- [28] ROSTÁSY, F.S.: *Baustoffe*
- [29] VUYK ENGINEERING ROTTERDAM B.V.: *Boom Based Blade Manipulator*. www.vuykrotterdam.com/uploads/news/id26/0verview.jpg. – Zugriff: 2014-06-04



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Böhm

Vorname: Oliver

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung eines mobilen Verfahrens zur (De)Montage von Rotorblättern einer Windenergieanlage ohne Verwendung aufwendiger Krantechnik

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

2014-08-04

Ort

Datum

Unterschrift im Original