



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Maximilian Witt

Entwicklung von Designkonzepten zur Instandhaltung und Wartung von Multirotor-Windenergieanlagen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Maximilian Witt

**Entwicklung von Designkonzepten zur
Instandhaltung und Wartung von
Multirotor-Windenergieanlagen**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Peter Dalhoff

Zweitprüfer/in: Abdullah Khisraw

Abgabedatum: 02.05.2025

Zusammenfassung

Maximilian Witt

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung von Designkonzepten zur Instandhaltung und Wartung von Multirotor-Windenergieanlagen

Stichworte

Multirotor-Windenergieanlagen, Offshore-Windenergie, Wartung und Instandhaltung

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Erstellung von Wartungskonzepten an einer Multirotor-Windenergieanlage und die anschließende Betrachtung dieser in Bezug auf Gewicht, Geschwindigkeit und Kosten.

Es werden geeignete Systeme zur Bewältigung definierter Wartungsaufgaben aufgezeigt und in Systemvarianten eingeteilt. Die geeignetsten Varianten werden in Modellen erstellt, mit auf dem Markt erhältlichen Anlagen ausgeführt und unter den genannten Aspekten untereinander verglichen. Die Ergebnisse werden zur Bewertung der Wartungssysteme und Ausführungsarten an Multirotor-Windenergieanlagen genutzt.

Maximilian Witt

Title of the paper

Development of Design Concepts for Maintenance of Multirotor-Wind Turbines

Keywords

Multirotor-Wind Turbines, Offshore-Wind Energy, Operation and Maintenance

Abstract

Inside this report maintenance concepts for Multirotor-Wind Turbines are created and evaluated based on the aspects of Weight, Speed and Cost.

Appropriate systems for defined maintenance tasks are listed and combined into system variants. The most suitable variants are created in models, implemented using systems available on the market and compared with each other under the aspects mentioned above. The results are used to evaluate the maintenance systems and designs for Multirotor-Wind Turbines.

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	I
II.	Nomenklatur.....	III
III.	Tabellenverzeichnis.....	V
1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Multirotorwindenergieanlagen.....	3
2.2	Aufbau der MRWEA.....	6
2.3	Wartungskonzepte an WEA.....	9
2.3.1	Onshore Wartungskonzepte.....	9
2.3.2	Besonderheiten bei Offshore Wartungskonzepte.....	13
2.3.3	Integrierte Wartungskonzepte an MRWEA.....	19
3	Erstellung der Konzepte.....	25
3.1	Abschätzung der Bauteilmassen und Bauteildimensionen.....	25
3.2	Anforderungsliste.....	27
3.3	Morphologischer Kasten.....	30
3.4	Variantenbewertung und Variantenwahl.....	37
3.5	Visualisierung der Konzepte.....	50
4	Durchführung der Konzeptanalyse.....	57
4.1	Konkretisierung der Konzepte.....	57
4.2	Gewichtsbetrachtung.....	59
4.3	Zeitbetrachtung.....	64

4.4	Kostenbetrachtung	70
5	Auswertung der Konzeptanalyse	74
5.1	Gewichtsbetrachtung.....	74
5.2	Zeitbetrachtung	76
5.3	Kostenbetrachtung	78
6	Zusammenfassung und Fazit	80
7	Ausblick.....	83
IV.	Abbildungsverzeichnis	XI
V.	Literaturverzeichnis.....	XIII
VI.	Anhang	XXII

II. Nomenklatur

Abkürzung	Bezeichnung
WEA	Windenergieanlage
MRWEA	Multirotor-Windenergieanlage
ERWEA	Einzelrotor-Windenergieanlage
LCOE	Levelized Cost of Electricity / Stromgestehungskosten
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
CTV	Crew Transfer Vessel
TP	Transition Piece
SOV	Service Operation Vessel
JUV	Jack Up Vessel
NREL	National Renewable Energy Laboratory

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
P	Leistung	w
c_p	Leistungsbeiwert	-
ρ	Dichte	kg/m ³
A_R	Rotorfläche	m ²
u_1	Windgeschwindigkeit vor der WEA	m/s ²
m	Masse eines Rotors einer MRWEA	kg
k	Proportionale Gewichtskonstante	-
d	Rotordurchmesser der MRWEA	m
M	Masse des Rotors einer ERWEA	kg
D	Rotordurchmesser der ERWEA	m
n	Anzahl der Rotoren der MRWEA	-
R	Rotorenmasseverhältnis	-

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
m_{RG}	Masse der Rotor-Gondelgruppe	kg
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
γ	Sicherheitsfaktor	-
$F_{Gewicht}$	Gewichtskraft	N
v_{rated}	Nennwindgeschwindigkeit	m/s^2
c_t	Schubbeiwert	-
F_t	Schubkraft	N
F_{Stab}	Stabkraft	N
D_{Stab}	Stabdurchmesser	m
σ_{yield}	Streckgrenze	Pa
E	Elastizitätsmodul	Pa
$r_{t,b}$	Wanddickenverhältnis	-
I	Flächenträgheitsmoment	m^4
l_{Stab}	Stablänge	m
$F_{Buckling}$	Kritische Knickkraft	N
$D_{Stab,Buckling}$	Knickstabiler Stabdurchmesser	m
V_{Stab}	Stabvolumen	m^3
m_{Stab}	Stabmasse	kg
k_{S355}	spezifische Stahlkosten	€/kg
K	Kosten	€
S	Strecke	m
v_{System}	Systemgeschwindigkeit	m/s^2
t	Dauer	s

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste	27
Tabelle 2: Morphologischer Kasten	34
Tabelle 3: Bewertungskriterien	37
Tabelle 4: Beispiel einer Gewichtungsmatrix	39
Tabelle 5: Gewichtung der Bewertungskriterien.....	40
Tabelle 6: Ausschnitt der Varianten für die Vorauswahl.....	41
Tabelle 7: Einzelbewertung Antransport Kleinteile.....	43
Tabelle 8: Anzahl der Bewertungen innerhalb der Prozesse.....	44
Tabelle 9: Gewichtete Einzelbewertung Antransport Kleinteile	45
Tabelle 10: Übersicht der gewichteten Einzelbewertungen.....	46
Tabelle 11: Auszug der Gesamtbewertung.....	48
Tabelle 12: Ergebnisvarianten der Variantenbewertung	49
Tabelle 13: Steckbrief zum Palfinger PTM 1500 Kran.....	57
Tabelle 14: Einsatzstunden und Transportmitteleinsätze der Varianten pro Jahr.....	69
Tabelle 15: Äquivalente Volllaststunden der Varianten	69
Tabelle 16: Bewertungskriterien	XXII
Tabelle 17: Gewichtungsmatrix Witt	XXIII
Tabelle 18: Gewichtungsmatrix Khisraw	XXIV
Tabelle 19: Varianten 1-8	XXV
Tabelle 20: Varianten 9-16	XXVI
Tabelle 21: Varianten 17-24	XXVII
Tabelle 22: Varianten 25-32	XXVIII

Tabelle 23: Varianten 33-40	XXIX
Tabelle 24: Varianten 41-48	XXX
Tabelle 25: Varianten 49-56	XXXI
Tabelle 26: Varianten 57-64	XXXII
Tabelle 27: Varianten 65-72	XXXIII
Tabelle 28: Einzelbewertung Antransport Großteile.....	XXXIV
Tabelle 29: Einzelbewertung Antransport Personal	XXXIV
Tabelle 30: Einzelbewertung Übergabe Großteile	XXXIV
Tabelle 31: Einzelbewertung Übergabe Kleinteile.....	XXXV
Tabelle 32: Einzelbewertung Übergabe Personal	XXXV
Tabelle 33: Einzelbewertung Lagerung	XXXVI
Tabelle 34: Einzelbewertung Inspektion	XXXVI
Tabelle 35: Einzelbewertung Wartung / Geringfügige Reparatur	XXXVI
Tabelle 36: Einzelbewertung Kleinteiltransport Vertikal	XXXVII
Tabelle 37: Einzelbewertung Kleinteiltransport Horizontal	XXXVII
Tabelle 38: Einzelbewertung Großteiltransport.....	XXXVIII
Tabelle 39: Einzelbewertung Personaltransport Vertikal.....	XXXIX
Tabelle 40: Einzelbewertung Personaltransport Horizontal.....	XXXIX
Tabelle 41: Einzelbewertung Ersatzpersonaltransport Vertikal	XXXIX
Tabelle 42: Nummerierung der Prozesse	XL
Tabelle 43: Gesamtbewertung Platzierung 1-8.....	XL
Tabelle 44: Gesamtbewertung Platzierung 9-16.....	XLI
Tabelle 45: Gesamtbewertung Platzierung 17-24.....	XLI

Tabelle 46: Gesamtbewertung Platzierung 25-32	XLII
Tabelle 47: Gesamtbewertung Platzierung 33-40	XLII
Tabelle 48: Gesamtbewertung Platzierung 41-48	XLIII
Tabelle 49: Gesamtbewertung Platzierung 49-56	XLIII
Tabelle 50: Gesamtbewertung Platzierung 57-64	XLIV
Tabelle 51: Gesamtbewertung Platzierung 65-72	XLIV
Tabelle 52: Stabdicken der horizontalen Tragestrukturanordnung	XLV
Tabelle 53: Stabdicken der vertikalen Tragestrukturanordnungen	XLVI
Tabelle 54: Steckbrief zum Liebherr RL 900 Kran	XLIX
Tabelle 55: Steckbrief zum NOV OC2809B Kran.....	L
Tabelle 56: Steckbrief zum Huisman Mastkran.....	LI
Tabelle 57: Steckbrief zum Konecranes ESP. 5 Kran	LII
Tabelle 58: Steckbrief zum Palfinger DKT 500 Kran.....	LIII
Tabelle 59: Steckbrief zum Kinocranes Portalkran	LIV
Tabelle 60: Steckbrief zum Aicrane Portalkran	LV
Tabelle 61: Steckbrief zum OEG Renewables CTV	LVI
Tabelle 62: Steckbrief zum Damen Shipyards SOV	LVI
Tabelle 63: Steckbrief zum Panamax Sized Cargo Vessel	LVII
Tabelle 64: Steckbrief zum Airbus AS 350 B3 Helikopter	LVII
Tabelle 65: Steckbrief zum PTB Special Products Hubwagen	LVIII
Tabelle 66: Steckbrief zum Morello Giovanni Hubwagen.....	LIX
Tabelle 67: Steckbrief zum Pallit Palettenheber.....	LX
Tabelle 68: Steckbrief zum HanseLifter Transportwagen.....	LXI

Tabelle 69: Steckbrief zum heightec Climber Kit.....	LXII
Tabelle 70: Steckbrief zur Käufer Windkraftbefahranlage	LXIII
Tabelle 71: Steckbrief zur DJI Drohne	LXIV
Tabelle 72: Steckbrief zur DJI Kamera	LXV
Tabelle 73: Steckbrief zur Reblade Wartungsdrohne.....	LXVI
Tabelle 74: Steckbrief zum WindSpider Blade Tool	LXVII
Tabelle 75: Steckbrief zum 3arm Manipulator.....	LXVIII
Tabelle 76: Steckbrief zur Wind Catching Systems Wartungsplattform.....	LXIX
Tabelle 77: Steckbrief zum Goracon Arbeitslift	LXX
Tabelle 78: Steckbrief zum Enabl C-Yoke	LXXI
Tabelle 79: Steckbrief zum Avanti Servicelift.....	LXXII
Tabelle 80: Steckbrief zum Goracon Servicelift	LXXIII
Tabelle 81: Steckbrief zur ActSafe Seilwinde	LXXIV
Tabelle 82: Steckbrief zum Hailo Wind Systems Leitersystem.....	LXXV
Tabelle 83: Berechnung des Gewichts der horizontalen Tragestruktur	LXXVI
Tabelle 84: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur mit Querstreben...	LXXVII
Tabelle 85: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur ohne Querstreben..	LXXX
Tabelle 86: Gewicht und Kosten der Plattformhilfsstruktur beim Rotorblattwechsel	LXXXII
Tabelle 87: Gewicht und Kosten der Plattformhilfsstruktur beim Getriebewechsel.....	LXXXII
Tabelle 88: Gewicht und Kosten der Greifarmhilfsstruktur beim Rotorblattwechsel	LXXXII
Tabelle 89: Gewicht und Kosten der Greifarmhilfsstruktur beim Getriebewechsel	LXXXII
Tabelle 90: Gewicht und Kosten der Kranschienen beim Getriebewechsel	LXXXIII
Tabelle 91: Gewicht und Kosten der Kranschienen beim Rotorblattwechselwechsel...	LXXXIII

Tabelle 92: Gewicht und Kosten der Aufzugshilfsstruktur	LXXXIII
Tabelle 93: Gewicht und Kosten der Laufstege	LXXXIII
Tabelle 94: Gewicht und Kosten des Helikopterlaufstegs	LXXXIII
Tabelle 95: Gewicht und Kosten der hängenden Schienenführung.....	LXXXIV
Tabelle 96: Gewicht und Kosten der Leitern	LXXXIV
Tabelle 97: Gewicht und Kosten der Lagerhalle	LXXXIV
Tabelle 98: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur ohne Querstreben unter Belastung der Laufstege.....	LXXXV
Tabelle 99: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur unter Belastung des Krans beim Getriebewechsel	LXXXVII
Tabelle 100: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur unter Belastung des Krans beim Rotorblattwechsel	LXXXIX
Tabelle 101: Gesamtgewicht der ausgewählten Varianten	XCI
Tabelle 102: Zeitbetrachtung der Variante 71 Einlagern	XCII
Tabelle 103: Zeitbetrachtung der Variante 71 Aus Lager Entnehmen.....	XCII
Tabelle 104: Zeitbetrachtung der Variante 71 Ohne Lager	XCII
Tabelle 105: Zeitbetrachtung der Variante 72 Einlagern	XCIII
Tabelle 106: Zeitbetrachtung der Variante 72 Aus Lager Entnehmen.....	XCIII
Tabelle 107: Zeitbetrachtung der Variante 37 Einlagern	XCIII
Tabelle 108: Zeitbetrachtung der Variante 37 Aus Lager Entnehmen.....	XCIV
Tabelle 109: Zeitbetrachtung der Variante 32 Ohne Lager	XCIV
Tabelle 110: Zeitbetrachtung der Variante 21 Einlagern	XCIV
Tabelle 111: Zeitbetrachtung der Variante 21 Aus Lager Entnehmen.....	XCV
Tabelle 112: Zeitbetrachtung der Variante 25 Einlagern	XCV

Tabelle 113: Zeitbetrachtung der Variante 25 Aus Lager Entnehmen.....	XCV
Tabelle 114: Investitionskosten der Varianten	XCVI
Tabelle 115: Anlagenkosten und Stromgestehungskosten der Varianten	XCVII

1 Einleitung

Im Jahr 2023 wurden 7,8 % der global erzeugten elektrischen Energie durch die Windenergie bereitgestellt [2]. Die installierte Leistung der Windenergie wurde in diesem Jahr um 117 GW auf einen Gesamtbetrag von 1021 GW ausgebaut [2]. Nach Prognosen wird die installierte Leistung der Windenergie bis 2033 jährlich um 15 % - 25 % ansteigen, wobei ein großes Potential im Offshore Sektor besteht [3]. Somit stellt die Windenergie einen entscheidenden Beitrag in der Stromgewinnung und der Bestimmung der Stromkosten dar und dieser Einfluss wird weiter steigen.

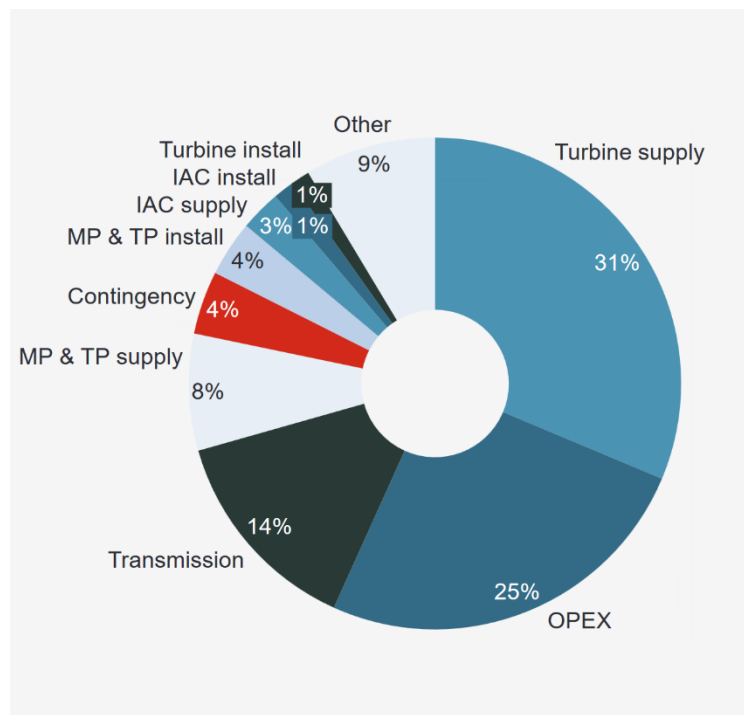


Abbildung 1: Zusammensetzung der LCOE eines offshore Windparks (2022) [1]

Ein entscheidender Faktor der Energiebereitstellung sind die Stromgestehungskosten, auch Levelized Cost of Energy (LCOE) genannt, welche die Kosten für den Aufbau und den Betrieb einer Anlage ins Verhältnis zur Gesamtmenge der durch die Anlage produzierten elektrischen Energie stellt [4]. Die erneuerbaren Energien aus Photovoltaik und Windenergie erzielen bereits vergleichbare bis geringere LCOE als die fossile Energiebereitstellung [5]. Trotzdem besteht bei ihnen noch Optimierungspotential, um die Stromkosten zu senken, und ein wirtschaftlicher Wettkampf, die geringsten LCOE zu erzielen. Ein großer Teil der LCOE wird durch die operativen Kosten der Anlage verursacht. Abbildung 1 zeigt, dass etwa 25 % der LCOE einer offshore Windenergieanlage (WEA), durch diese operativen Kosten verursacht wird [1]. Bei einer onshore WEA liegt der Anteil bei einem ähnlichen prozentualen Wert, jedoch sind die absoluten Kosten um ein 2,5-faches geringer als im offshore Bereich [6]. Der bisherige Trend der Windindustrie war es, die WEA größer zu dimensionieren, um die LCOE zu

senken [7]. Somit war der Mittelwert der Nennleistung der 2023 in Europa installierten offshore WEA mit 9,7 MW um 20 % höher als im Vorjahr [8]. Die mittlere Nennleistung der für 2024 bestellten WEA im selben Bereich lag bei 14,9 MW [8]. Diese höher Skalierung der WEA sorgt zwar für eine Reduktion der Operativen Kosten, jedoch nehmen die Kosten für die nicht produzierte Energie während der Ausfälle zu, wie in Abbildung 2 dargestellt [9]. Hierdurch wird vor allem im offshore Bereich, mit längeren Ausfallzeiten, die Ausfallrate und die Wartungszeiten ein zunehmender Einfluss der Stromgestehungskosten.

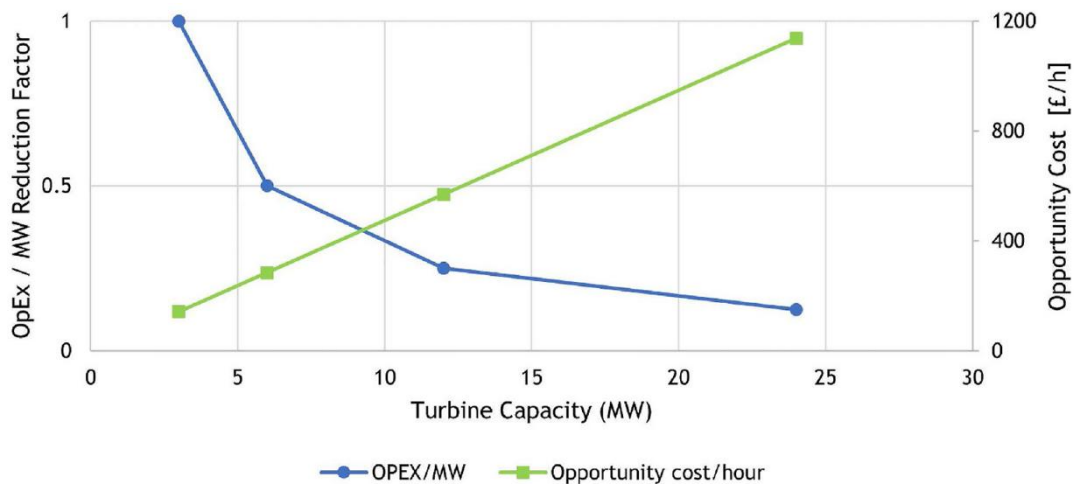


Abbildung 2: Voraussichtliche operative Kostenminderung und Ausfallkosten über die Anlagennennleistung [9]

Die Multirotor-Windenergieanlagen (MRWEA) stellen ein innovatives Konzept zur Verwendung mehrerer kleiner Rotoren, statt eines großen Rotors, an einer Anlage dar [10]. Dieser Aufbau weist ein geringeres Gewicht und Investitionskosten als Einzelrotor-Windenergieanlagen (ERWEA) auf [11]. Zudem funktioniert die Skalierung der MRWEA über Ergänzung standardisierter Komponenten, ohne dass die Rotoren neu ausgelegt werden müssen [11]. Die kleineren Bauteile als bei ERWEA vereinfachen die Transportthematik im onshore und offshore Bereich [12]. Weiterhin führen einzelne Rotorausfälle der MRWEA nicht zum totalen Leistungsverlust der Anlage, sodass viele Kostenfaktoren gegenüber der ERWEA geringer ausfallen und eine Verringerung der LCOE bei MRWEA prognostiziert werden [11].

Die operativen Kosten bei MRWEA werden aufgrund kleinerer Bauteile und Gewichte geringer als bei ERWEA eingeschätzt [12]. Jedoch sind die konkreten Wartungsmechanismen noch in der Entwicklung und eine genaue Einschätzung kann nicht getroffen werden. Im Rahmen dieser Ausarbeitung sollen Wartungs- und Instandhaltungskonzepte für MRWEA entwickelt werden. Diese sollen fest an der Anlage installiert sein und für den Transport von Bauteilen und Wartungspersonal genutzt werden. Ziel ist es, dass die Konzepte möglichst geringe LCOE erzielen. Hierbei wird ein vermehrter Fokus auf die Investitionskosten und die Wartungszeiten der Konzepte gelegt.

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der MRWEA dargelegt und die aktuellen Transportkonzepte an ERWEA und MRWEA aufgelistet.

2.1 Multirotorwindenergieanlagen

Die MRWEA sind WEA, bei denen sich mehrere Rotoren an einer Tragstruktur befinden, die unabhängig voneinander betrieben werden können. Die Leistungen der einzelnen Rotoren wird zusammengeführt, um die Gesamtleistung der Anlage zu bilden.

THE SQUARE-CUBE LAW

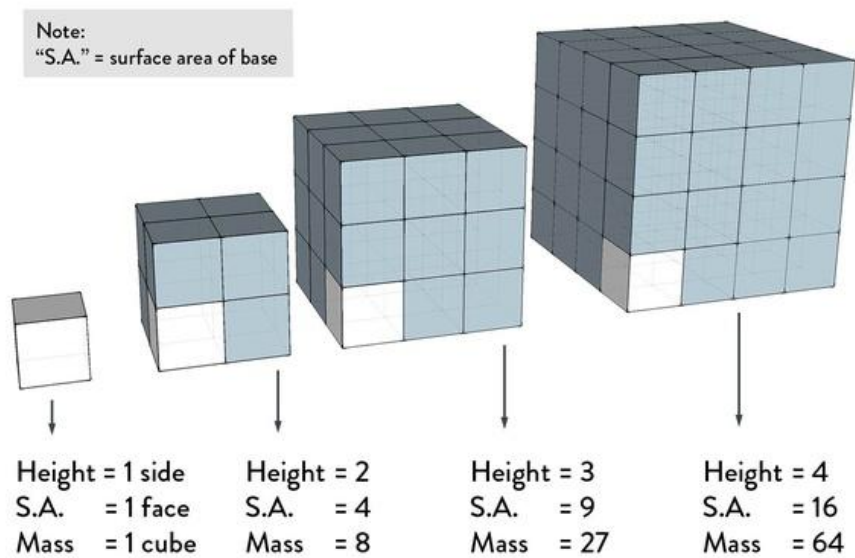


Abbildung 3: Veranschaulichung des Square-Cube Law [13]

Die Grundidee mehrere kleiner Rotoren, anstatt eines großen Rotors für dieselbe Nennleistung zu nutzen, entstammt aus dem Square-Cube Law. Dieses besagt, dass wenn ein Körper proportional vergrößert wird, die Oberfläche quadratisch ansteigt und das Volumen kubisch ansteigt. Dies wird in Abbildung 3 veranschaulicht [13]. Bei gleichbleibender Dichte ρ ist die Masse proportional zum Volumen. Bei WEA ist die Leistung P nach Formel 1 proportional zu Rotorfläche A_R [14]. Dies bedeutet also um eine ERWEA auf eine höhere Nennleistung zu skalieren, wird der Rotordurchmesser vergrößert, wodurch vereinfacht betrachtet die Rotorfläche quadratisch und die Rotormasse kubisch ansteigt. Somit steigt bei der Skalierung von ERWEA das Verhältnis von Masse zu Leistung linear an [15].

$$P = c_p \frac{\rho}{2} A_R u_1^3 \quad (1)$$

Betrachtet man nun in vereinfachter Form die Rotorenmasse von MRWEA und ERWEA, ergibt sich die Masse eines Rotors der MRWEA m aus Formel 2 und die Masse bei der ERWEA M aus Formel 3 [16]. Hierbei ist d der Durchmesser eines Rotors der MRWEA und D der Rotordurchmesser der ERWEA. Für einen Massevergleich sollen die beiden Anlage dieselbe Nennleistung erzielen. Deshalb wird die Rotorfläche vereinfacht nach Formel 4 gleichgesetzt mit n als der Anzahl an Rotoren der MRWEA [16]. Stellt man nun die Formel um und stellt das Verhältnis der Massen von MRWEA und ERWEA R wie in Formel 5 dar, ergibt sich das MRWEA bei gleicher Nennleistung die $\frac{1}{\sqrt{n}}$ -fache Rotorenmasse von ERWEA aufweisen [16]. Eine MRWEA mit 16 Rotoren besitzt dem her bei gleicher Nennleistung ein Viertel der Rotorenmasse einer ERWEA. Dies bedeutet einen Gewichtsvorteil und eine Materialkostensparnis der MRWEA gegenüber der ERWEA.

$$m = kd^3 \quad (2)$$

$$M = kD^3 \quad (3)$$

$$D^2 = nd^2 \quad (4)$$

$$R = \frac{nm}{M} = \frac{nk d^3}{kD^3} = \frac{n \left(\frac{D}{\sqrt{n}}\right)^3}{D^3} = \frac{n}{\sqrt{n}^3} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Der Aufbau der MRWEA erfordert eine Tragestruktur, welche die Investitionskosten anhebt. Die Kosten der Tragestruktur fallen jedoch geringer als die Kostensparnis bei den Rotoren und Naben aus [11].

Bei den Rotoren einer MRWEA wird zurzeit davon ausgegangen, dass eine Anzahl identischer Rotoren verbaut wird [9]. Zur Skalierung einer MRWEA auf eine höhere Nennleistung kann die Tragestruktur erweitert werden und die Anzahl der Rotoren erhöht werden. Die Verwendung vieler kleiner identischer Teile an den Anlagen, würde eine standardisierte und automatisierte Produktion der Teile ermöglichen. Dies wiederum senkt die Produktionskosten der Teile im Vergleich zu großen Spezialanfertigungen, wie die Rotorblätter moderner ERWEA [11].

Das geringere Bauteilgewicht und Bauteilgröße der MRWEA bieten die Möglichkeit günstigere Transportmöglichkeiten zu nutzen [12]. ERWEA weisen große Bauteile auf, die im onshore Bereich zu LKW-Transporten mit Überbreite und Überlänge führen [15]. Dies führt zur Einschränkungen der Transportroute und Kosten, welche bei MRWEA nicht anfallen. Im offshore Bereich können für MRWEA-Bauteile kleiner Transportschiffe genutzt werden als bei ERWEA-Bauteilen. Durch das geringere Bauteilgewicht kann ein fest auf der Anlage installierter Kran oder Transportmechanismus den Wartungsbetrieb durchführen. Somit ist es

nicht nötig Landkräne oder Kranschiffe für die Wartungsarbeiten anzufordern. Besonders im offshore Bereich stellen die Kranschiffe einen großen Teil der Wartungskosten dar [9].

Wenn die Rotoren einer MRWEA und ERWEA dieselbe Ausfallrate besitzen, kommt es bei der MRWEA um ein n -faches häufiger zu Rotorenausfällen. Der Rotorausfall bei der MRWEA stellt jedoch nur einen Ausfall von $\frac{1}{n}$ der Anlagenleistung dar. Im Mittel kommt es daher zum selben Leistungsverlust durch Ausfälle bei MRWEA und ERWEA. Die Möglichkeit die MRWEA mit geringerer Leistung weiter zu Betreiben und den günstigsten Wartungstermin zu planen, bietet einen Vorteil gegenüber der ERWEA [11]. Die Wartungsbereitschaft stellt vor Allem im offshore Bereich ein Problem dar. Die Verfügbarkeit der Kranschiffe ist begrenzt und die Wetterlage kann ein großes Risiko für die Wartungseinsätze bedeuten [9]. Deshalb kann es bei offshore ERWEA zu Wartungsverzögerungen kommen, die die Kosten durch nicht produzierte Energie erhöhen. Die Planbarkeit der Wartung bei MRWEA erhöht die Sicherheit der Wartung und kann die Energieverluste hierzu minimieren. Des Weiteren können bei MRWEA ganze Rotormodule ausgetauscht werden, um die Wartung an Land vorzunehmen [9]. Dies verringert die Wartungszeit und die Anzahl an qualifizierten Wartungsarbeitern, die vor Ort an der Anlage anwesend sein müssen. Die höheren erzielbaren Nennleistungen von MRWEA mindert die Anzahl an WEA in einem Windpark zu einem Vergleichbaren ERWEA-Windpark. Hierdurch werden Transport- und Anlandungsprozesse vermindert, was Zeit und somit Kosten einsparen kann [12].



Abbildung 4: W2Power Projekt von EnerOcean (links) [19]; Liftkonzept von Wind Catching Systems (rechts) [20]

Die MRWEA bieten in der Theorie viele Verbesserungen bei aktuellen Problemen der ERWEA, jedoch bestehen noch keine praktischen Anwendungen die, die theoretischen Kostenersparnisse erreichen [12]. Zurzeit kommt es im Feld der MRWEA nur zur Modelltestungen. Die Prototypen weisen noch keine jahrelange Optimierung wie die ERWEA auf, sodass die Ergebnisse zumeist Probleme der Modelle aufzeigen und die Leistungswerte von der Theorie abweichen. Beispielhaft wird dies in diesen Ausarbeitungen zu einer Zwei-

Rotor-Anlage [17] und einer Vestas-Multirotor-Anlage [18] gezeigt. Die Kostenersparnis durch die standardisierte Bauteilfertigung ist bisher nicht vorhanden [12]. Aufgrund der theoretisch höheren Kostenersparnis konzentrieren sich viele MRWEA-Projekte auf den offshore Bereich mit Anwendung auf Schwimmplattformen. Die Schwimmplattformen können in Bereichen mit höheren Wassertiefen eingesetzt werden, die zumeist weiter Transportwegen bedeuten. Hiermit könnten die Transportvorteile und die Nutzung günstigerer Schiffe bei der MRWEA im größerem Maße in die LCOE einwirken. Aktuelle MRWEA-Projekte befinden sich auf dem Technology Readiness Level (TRL) von Vier bis Sechs. Die am weitesten entwickelten Konzepte sind Projekte mit Zwei Rotoren auf Schwimmplattformen, welche auf dem Meer unter Realbedingungen getestet werden. Eine dieser Anlagen ist in Abbildung 4 gezeigt [19, 20]. Weitere Projekte werden derzeit von Myriad Wind Energy Systems [21] und der Energie Baden-Württemberg AG [22] durchgeführt. Die Wartungskonzepte der Projekte sind jedoch nur für die Anlagen von Wind Catching Systems detaillierter beschrieben [20]. Wie in Abbildung 4 dargestellt, soll ein Transportlift für den Austausch von Bauteilen genutzt werden.

2.2 Aufbau der MRWEA

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, sind die MRWEA zurzeit in der Entwicklungsphase mit TRL von bis zu Sechs. Somit gibt es keine bereits etablierte Bauweise oder Aufbau von MRWEA. Diese Kapitel behandelt die in den bisherigen Projekten genutzten Aufbauten von MRWEA.

Zumeist werden in den entwickelten Projekten Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT) mit Luvläufer Ausrichtung und Pitchsteuerung genutzt. Diese Art der WEA erzielt höhere Leistungsbeiwerte als Vertical Axis Wind Turbines (VAWT), geringere Belastungen als eine Stall-Anlage und ist die zurzeit am besten optimierte Art der WEA [11]. Die VAWT werden vereinzelt, wegen einem Potential auf geringere Belastungen an der Anlage als Multirotorkonzept untersucht [23].

Die Optimierung der HAWT ging bisher zeitlich mit der Skalierung der Anlagen auf größer Nennleistungen einher [16]. Somit können die größeren Rotoren momentan Werte nahe des theoretisch optimale Leistungsbeiwerts erzielen. Kleinere Rotoren sind aus geringerem wirtschaftlichem Interesse nur im geringerem Maße als die Großrotoren optimiert [16]. Aus diesem Grund nutzen die fortschrittlichsten MRWEA Projekte eine geringe Anzahl an Rotoren mit einer hohen einzelnen Nennleistung dieser [17]. Die größeren Rotoren liegen zudem näher an dem heutigen industriellen Standard, weshalb detailliertere Daten zur Anfertigung verfügbar sind und die Produktionsstandorte bereits vorhanden sind [16]. Diese Modelle sind für die Einführung der MRWEA in den aktuellen Markt gedacht, da sie die Vorteile der MRWEA unter

den derzeitigen Marktbedingungen maximieren. Mit einer Anpassung der Industrie auf MRWEA, sollten MRWEA mit mehreren kleinen Rotoren, jedoch, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, bessere LCOE erzielen.

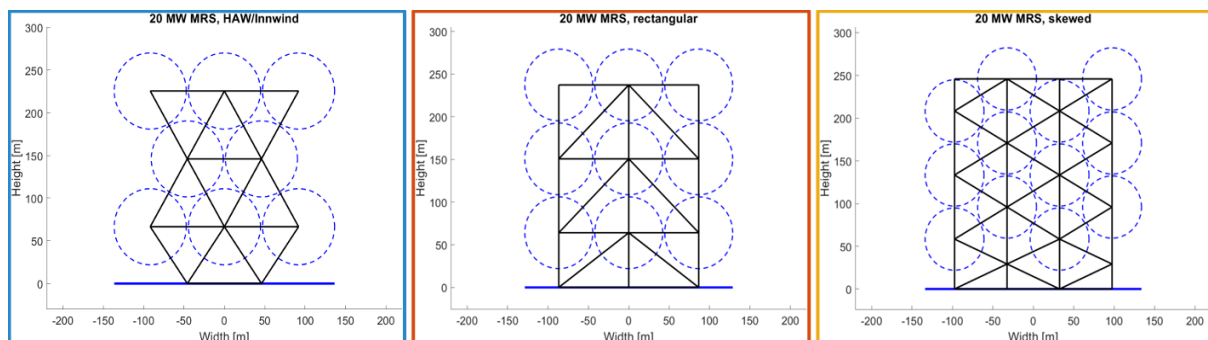
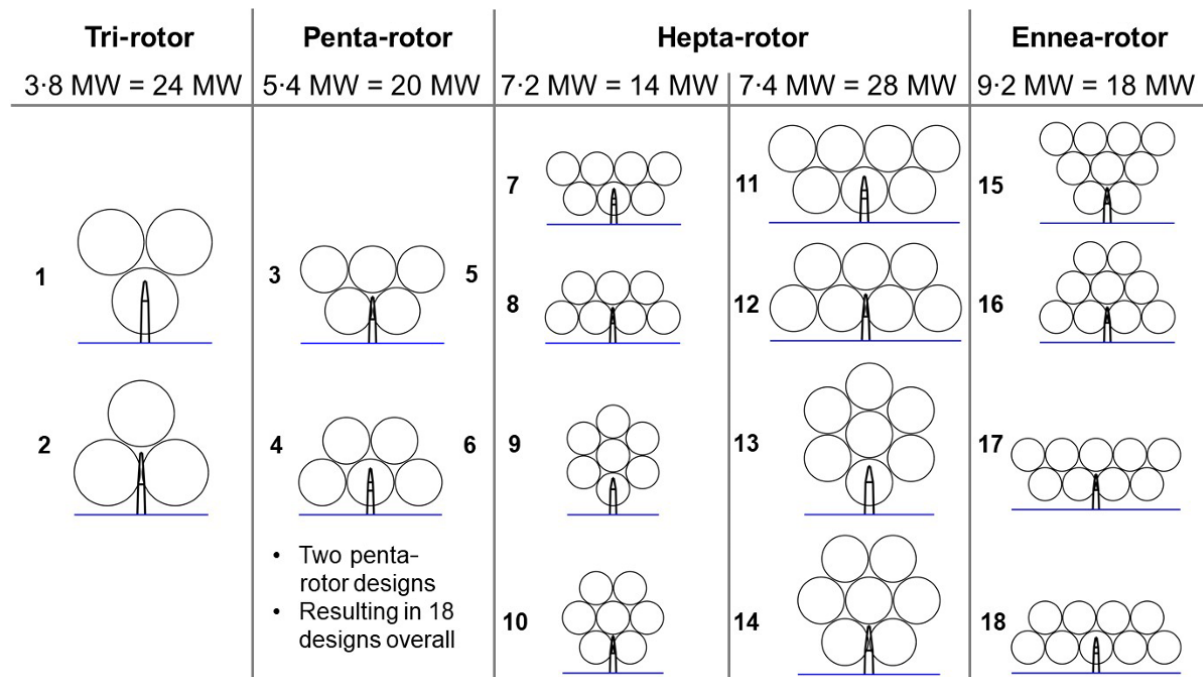


Abbildung 5: Mögliche Anordnungen einer MRWEA mit Turm (oben) [24] und ohne Turm (unten) [26]

MRWEA Konzepte mit Zwei Rotoren im offshore Bereich, besitzen pro Rotor einen Turm, welche gemeinsam an einer Schwimmplattform befestigt sind [17]. Dies ist in Abbildung 4 zu sehen [19]. Bei mehr als Zwei Rotoren kommt es zum Einsatz einer Tragstruktur, an welcher die Rotoren befestigt sind. Diese Tragstrukturen sind als Fachwerkstrukturen ausgeführt, da diese das geringste Gewicht für die erforderliche Belastbarkeit erzielen. Die Tragstruktur kann mit einem Turm über Fest-Los-Lagerung verbunden werden [24]. Dies ermöglicht eine Azimutsteuerung der Anlage analog zur ERWEA. Bei Schwimmplattformen werden auch Konzepte entwickelt, bei denen die Tragstruktur an ihrem unteren Ende direkt mit einem Teil der Schwimmplattform verbunden ist, welcher die Azimutsteuerung ermöglicht [11].

Die vertikale Position der Verbindung zwischen der beweglichen Tragstruktur und der befestigten Grundstruktur beeinflusst die Art und den Betrag der auf die Tragstruktur wirkende

Kräfte [25]. Bei einer vereinfachten Betrachtung reiner Stabkräfte wirken bei einer höheren Verbindungsposition vermehrt Zugkräfte und vermindert Druckkräfte [25]. Bei einer niedrigen Verbindungsposition treten mehr Druckkräfte auf und die Knickbelastung wird erhöht. Durch die Unterschiede in den wirkenden Kräften muss die Tragstruktur entsprechend dimensioniert werden, um diesen standzuhalten. Die Verbindung auf mittlerer Tragstrukturhöhe mittels eines Turms ermöglicht die kleinste Tragstrukturdimensionierung und somit das geringste Tragstrukturgewicht [25]. Wenn die Verbindung am unteren Tragstrukturende durchgeführt wird, muss die Tragstruktur größer dimensioniert werden, aber es kann auf den Turm verzichtet werden.

Die Tiefe der Tragstruktur beeinflusst zusätzlich die Kräfteverteilung bei Belastung dieser. Hierbei erzielt eine Tiefe zwischen 10 % bis 13 % von der Tragstrukturbreite eine optimale Kräfteverteilung und ermöglicht somit die geringste Dimensionierung der Tragstruktur [25].

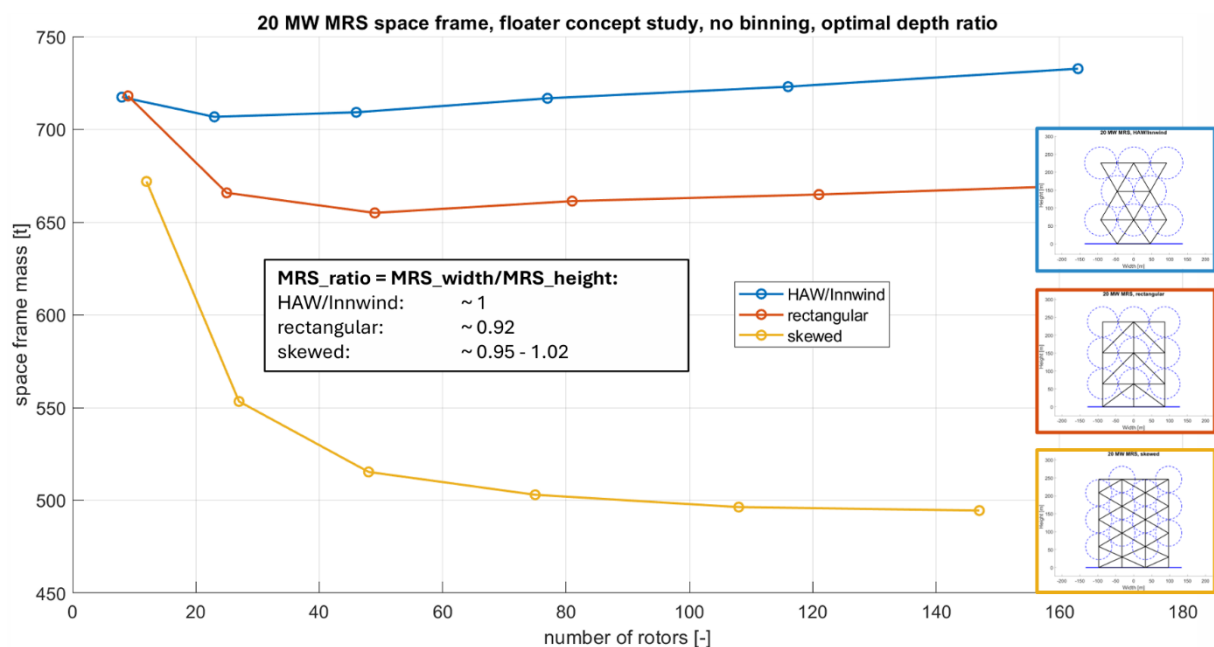


Abbildung 6: Massevergleich der Tragstrukturen bei horizontaler und vertikaler Rotoranordnung [26]

Die Rotoren werden an der Tragstruktur mit dem geringstem Abstand, bei Betrachtung des Rotorradius und eines Sicherheitsabstands, angeordnet [25]. Diese dichteste Packung der Rotoren führt je nach Aufbau zu Abwandlungen eines hexagonalen Aufbaus. Bisher wurden die Rotoren meist in horizontalen Reihen mit dichtester Packung ausgerichtet. Hierbei gibt es wie in Abbildung 5 gezeigt, je nach Rotoranzahl verschiedene Bottom-Up, Top-Down und hexagonale Anordnungen [24]. In neueren Betrachtung wird jedoch auch die Anordnung der Rotoren in vertikalen Reihen genutzt [26]. Die vertikale Ausrichtung ermöglicht eine direktere Kraftübertragung in vertikale Richtung der Tragstruktur [26]. Hierdurch kann vor allem bei Anlagen ohne Turm eine deutlich geringere Dimensionierung der Stäbe als bei der horizontale Anordnung erzielt werden. Gewicht und Kosten werden somit verringert. Diese

Gewichtseinsparung wird in Abbildung 6 verdeutlicht [26]. Die Ausrichtung beeinflusst zudem die möglichen Transportkonzepte an der MRWEA. Bei vertikaler Ausrichtung können Maschinen vertikal verfahren werden, während sie bei horizontaler Ausrichtung horizontal bewegbar sind.

2.3 Wartungskonzepte an WEA

Bei den WEA treten verschiedene Aufgaben auf, die unterschiedliche Herangehensweisen zur Wartung erfordern. Diese Wartungsaufgaben werden meist in die Kategorien Inspektion, Wartung, geringfügige Reparaturen und umfangreiche Reparaturen eingeordnet [27]. Die Inspektion umfasst die Überwachung und Begutachtung von Bauteilen und eine Einschätzung, ob und wann Reparaturen ausgeführt werden müssen. Zu der Wartung zählt die Aufrechterhaltung des korrekten Betriebs der Anlagen. Hierin fällt mitunter die Reinigung von Bauteilen und die Schmierung dieser. Geringfügige Reparaturen bestehen zum Beispiel aus vor Ort Reparaturarbeiten an den Rotorblättern und Reparaturen elektrischer Leitungen und kleiner elektronischer Bauteile an der Anlage. Bei den umfangreichen Reparaturen kommt es zum Austausch oder Erneuerung großer Bauteile, wie dem Generator, dem Getriebe, dem Transformator, der Rotorblätter oder dem Turm. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Verfahren zur Bewältigung dieser Aufgaben unter unterschiedlichen Bedingungen beschrieben.

2.3.1 Onshore Wartungskonzepte

Die Grundlegende Wartung einer onshore WEA wird in regelmäßigen Zeitintervallen durchgeführt. Dieser Intervall ist zumeist halbjährig [28]. Bei diesen Wartungen werden die Inspektion der mechanischen und elektrischen Bauteile, regelmäßige Wartungsarbeiten und geringfügige Reparaturen durchgeführt [29]. Neben der Inspektion im Zeitintervall werden Systeme zur permanenten Überwachung kritischer Bauteile in den Anlagen installiert. Die dauerhafte Echtzeitüberwachung lässt die Schadensentstehung am Bauteil genauer prognostizieren und ermöglicht einen präventiven Wartungsansatz. Hierfür werden beispielsweise Schwingungssensoren genutzt, welche ermöglichen bei Änderungen der Maschinenschwingung ein Bauteilversagen im Getriebe oder am Rotor vorherzusagen [29]. Bei Erkennung eines bevorstehenden Bauteilversagens wird eine Wartung veranlasst um Folgeschäden, durch einen Bauteilausfall, zu verhindern und die Stillstandszeiten zu minimieren. Hierdurch werden die Kosten und Ertragsverluste bei einem Bauteilversagen verringert. Beim Betrieb einer MRWEA führt ein Bauteilausfall nicht zum Totalstillstand der Anlage, sodass der Ertragsverlust nicht für die ganze Anlage einsetzt. Dies ermöglicht bei nicht präventiv detektierten Schadensfällen eine zeitflexiblere Planung des Wartungseinsatzes.

Für die Inspektion, Wartung und geringfügigen Wartungsarbeiten in der Gondel oder dem Turm der WEA, müssen Wartungsmitarbeiter diesen mit dem Werkzeug und Ersatzteilen erreichen können. In einer onshore WEA sind für diesen Personen- und Werkzeugtransport Wartungslifts installiert, welche bis in die Gondel fahren [30]. Zudem sind Leitern den Turm hinauf vorhanden. Innerhalb des Turms befinden sich mehrere Abschnitte mit begehbaren Böden, welche die mögliche Fallhöhe von den Leitern reduzieren [31]. Diese Transportbestandteile sind in Abbildung 7 auf der linken Seite gezeigt [30]. Für den Transport mittelgroßer Ersatzteile, welche nicht von den Menschen oder im Lift transportiert werden können, befindet sich ein kleiner Wartungskran in der Gondel [31]. Dieser kann die Ersatzteile an einem Stahlseil bis in die Gondel transportieren.



Abbildung 7: Wartungslift innerhalb einer ERWEA (links) [30]; Rotorblattwartungslift (rechts) [33]

Um Inspektionen an dem Turm oder dem Rotorblatt durchzuführen, werden qualifizierte Arbeiter entweder mit einer Kletterausrüstung entlang des Bauteils abgeseilt oder ein Wartungslift wird mit Seilen an der Gondel befestigt und entlang der Bauteile geführt [32]. Eine Ausführung dieser Wartungslifte zur geringfügigen Reparatur am Rotorblatt wird in Abbildung veranschaulicht [33].

Eine weitere Art, um die optische Inspektion an Turm und Rotorblatt durchzuführen ist der Einsatz von Drohnen [27]. Diese sind jeweils mit einer Kamera ausgestattet und lassen den Techniker vom Boden aus eine optische Analyse der Bauteile durchführen. Zur optischen Inspektion am Rotorblatt können weiterhin hochauflösende Kameras am Turm angebracht werden [27]. Durch Verfahren und Rotieren der Rotorblätter können diese anhand des Kamerabildes inspiziert werden. In einem aktuellen Projekt wird zudem die Möglichkeit untersucht, die gesamte Inspektion und geringfügigen Reparaturen am Rotorblatt ohne Einsatz von Arbeitern in erhöhten Positionen zu ermöglichen [34]. Hierfür soll eine Kombination an kletterfähigen Robotern und Drohnen die Durchführung der Aufgaben durch Techniker am Boden ermöglichen. Hauptstück dieses Projekts ist ein ringförmiger Kletterroboter, welcher durch Reibung am Turm verfahren kann. Dieser Roboter transportiert eine Wartungskabine, die an das Rotorblatt angesetzt werden kann. Innerhalb der Wartungskabine befindet sich ein Roboterarm, der ähnlich einem Fertigungszentrum ausgestattet ist und mit Werkzeugwechsel die verschiedenen Aufgaben am Rotorblatt durchführen kann. Dieses Projekt befindet sich zurzeit in der Konzeptvalidierung anhand eines Prototyps, wie in Abbildung 8 gezeigt [34].

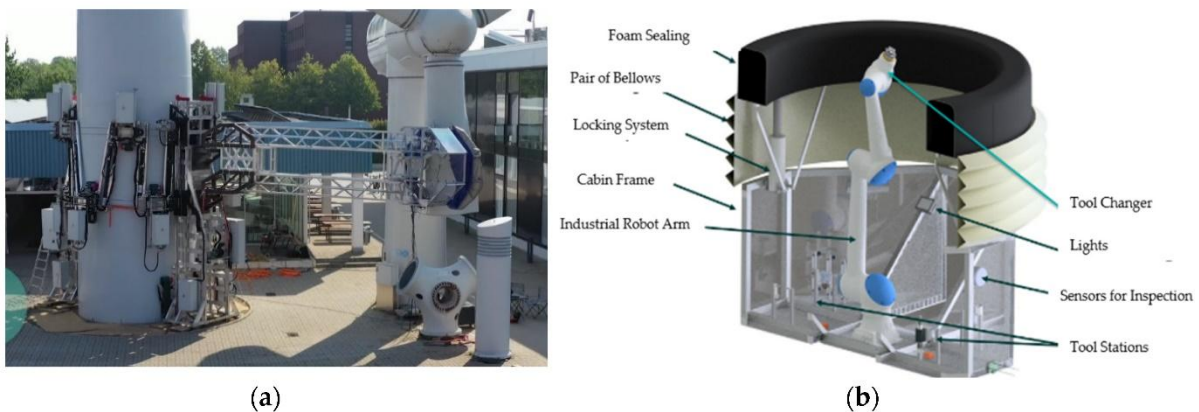


Abbildung 8: Climbing Ring Robot Prototyp (links) [34]; Wartungskabine (rechts) [34]

Das Durchführen von umfangreichen Reparaturen an onshore WEA erfordert im konventionellen Fall den Einsatz eines Turmdrehkranes [28]. Dieser muss vor Ort errichtet werden und auf einen geeigneten Untergrund gestellt werden. Der genauere Ablauf eines Rotorblattwechsels wird in Kapitel 2.3.2 mit Bezug auf den offshore Bereich erläutert. Eine neue Art von Kransysteme setzt darauf den Turm der WEA als Stützstruktur zu nutzen und sich selbst, nach anfänglicher Positionierung, entlang des Turms zu errichten oder zu verfahren. Hierdurch soll der Aufbau des Kran einfacher als bei Turmdrehkran ablaufen und keine Vorbereitung einer Standfläche für den Kran nötig sein [35]. Wegen der festen Verbindung von Kran und WEA wird die Schwankung zwischen Bauteil und WEA verringert [36]. Zudem ist die erreichbare Kranhöhe abhängig von der Turmhöhe der WEA, sodass die Kranhöhe in jedem Fall ausreichend für die Wartungsarbeiten ist [37]. Dies stellt unter Betrachtung der stetig größer skalierten ERWEA ein Vorteil zum konventionellen Kransystem dar. Zudem setzen einige System auf einen Bauteiltransport über Schienen entlang der selbsterrichteten Transportstruktur, um die Begrenzung der Höhe durch Sicherheitsbestimmungen für das Kranseil zu entgehen [36]. Abbildung 9 zeigt links einen Kletterkran [37] und rechts einen am Turm errichteten Kran [38].



Abbildung 9: Krankonzepte am Turm der WEA: Kletterkran (links) [37]; selbsterrichteter Kran (rechts) [38]

2.3.2 Besonderheiten bei Offshore Wartungskonzepten

Die Zugänglichkeit der WEA gibt an welchen Prozentanteil der Zeit die Wartungsarbeiter die Anlage erreichen und betreten können, um Wartungen aller Art durchzuführen. Offshore WEA weisen für Arbeiter, Maschinen und Bauteile eine geringere Zugänglichkeit als onshore WEA auf [39]. Die Anreise wird größtenteils mit Hilfe von Schiffen bewältigt, welche je nach Entfernung der WEA zur Küste zwischen mehreren Stunden und Tagen an Fahrzeit benötigen [40]. Für diesen Anfahrtszeitraum und das Betreten der Anlagen müssen die Wetterbedingungen, wie die signifikante Wellenhöhe und die Windgeschwindigkeit, in einem moderaten Bereich liegen, um die Sicherheit der Angestellten zu gewährleisten und das Risiko eines Schadens während der Arbeiten zu verringern [40]. Dieser Bereich hängt von den verwendeten Transportmitteln und WEA-Strukturen ab. Die Zugänglichkeit der WEA muss mindestens 80 % betragen, um eine Anlagenverfügbarkeit von 90 % zu erzielen [41].



Abbildung 10: Monohull CTV (links) [40]; Small Waterplane Area Twin Hull CTV (rechts) [40]

Bei Inspektion, Wartung oder geringfügiger Reparatur werden die Arbeiter zumeist mit den kleinen Bauteilen und Werkzeugen per Crew Transfer Vessel (CTV) zur WEA transportiert [40]. Diese bieten eine kostengünstige und relativ schnelle Transportmöglichkeit zu küstennäheren Standorten. In der Regel können hierbei bis zu zwölf Techniker auf einem CTV transportiert werden [42]. Für den Personalübergang auf die Anlage in der einfachsten Form, bildet der mit Fendern besetzte Bug des CTV einen Reibungsschluss mit dem Fundament der WEA und die Arbeiter können an einer Leiter am Fundament zum Transition Piece (TP) der Anlage klettern [42]. Der Übergang wird in Abbildung 10 links gezeigt [40]. Die Fracht des Schiffs wird von einem an der Anlage eingebauten Kran auf die Plattform des TP gehoben [42].

Die ersten eingesetzten CTVs waren Monohull CTVs, diese sind aus umgebauten Multifunktionsschiffen erstellt worden [40]. Sie sind günstig und skalierbar, aber weisen eine

geringere Geschwindigkeit auf als modernere CTVs und sind nur bei einer signifikanten Wellenhöhe von bis zu 1,5 m sicher verwendbar [40]. Des Weiteren werden Katamaran CTVs und Trimaran CTVs genutzt. Diese sind bei einem geringeren Treibstoffverbrauch schneller als Monohull CTVs, aber kosten auch mehr in der Anschaffung [40]. Zudem weisen sie eine besseres Fahrverhalten mit einer befahrbaren signifikanten Wellenhöhe von bis zu 2 m und 2,5 m für Katamaran- und Trimaran CTVs auf [40]. Ähnliche befahrbare signifikante Wellenhöhen von bis zu 2,5 m weisen die CTVs der Art Small Waterplane Area Twin Hull und Surface Effect Ships auf [40]. Small Waterplane Area Twin Hull CTVs vermindern den Schiffsquerschnitt auf Höhe der Wasseroberfläche, wie in Abbildung 10 rechts dargestellt, um eine erhöhte Stabilität und einen geringeren Treibstoffverbrauch zu erzielen [40]. Die Bauform der Surface Effect Ships sorgt für die Bildung eines Luftkissens unter dem Kiel des Schiffs, sodass der Wasserwiderstand geringer ist und höhere Geschwindigkeiten bei niedrigerem Treibstoffverbrauch erzielt werden [40]. Beide dieser Bauarten weisen jedoch eine komplexere Form auf, welche die Kosten der Schiffe erhöht [40].

Der Übergang von CTV und anderen Schiffen auf die Anlage stellt eine Gefahrenpotential für die Arbeiter und die Bauteile dar und kann nicht sicher bei hohen signifikanten Wellenhöhen durchgeführt werden [43]. Die Schwankungen des Schiffs beim Übergang auf die WEA kann zu einem Sturz oder Verletzungen der Personen führen. Der Zugang zu Schwimmplattformen ist besonders kritisch, da nicht nur das Schiff erheblicher Schwankungen erfährt, sondern auch die Schwimmplattform [44]. Durch diese Schwankungen wird die Zugänglichkeit der Anlagen beschränkt, sodass Systeme entwickelt wurden, um die Sicherheit zu erhöhen. Zum einen werden bewegungskompensierende Gangways verwendet [40]. Die Gangways sind auf dem Schiff installiert und führen bei CTVs bis zur Leiter unterhalb des TP. Die Bewegungen werden aktiv oder passiv kompensiert. Bei dem passiven Verfahren ist die Gangway mit einem Feder-Dämpfer-System mit dem Schiff verbunden, sodass die meisten Bewegungen hier kompensiert werden [40]. Das aktive System erfasst mit Sensoren die Bewegungen des Schiffes während des Übergangs und gleicht sie durch Einsatz hydraulischer Bewegungskomponenten aus [43]. Eine aktiv bewegungskompensierte Gangway wird in Abbildung 11 links gezeigt [40]. Hierdurch kommt es zu einer sehr geringen Bewegung auf der Gangway. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung des Kran auf dem TP und einer Gondel, in welcher die Arbeiter zum TP gehoben werden [45]. Der Kran übernimmt auch den Bauteiltransport für diese Wartungsarten mit CTVs. Weiterhin gibt es Systeme, bei denen entweder das Schiff mit hydraulischen Armen an dem WEA-Fundament festgeklemmt wird oder die Leiter des Fundaments bei Beginn des Übergangs an dem Schiff befestigt wird [45]. Durch diese festen Verbindungen wird die Bewegung zwischen Leiter und Schiff verringert.

Mit Einsatz dieser Systeme wird eine höhere Sicherheit erzielt und die WEA kann auch bei schlechteren Wetterbedingungen betreten werden.

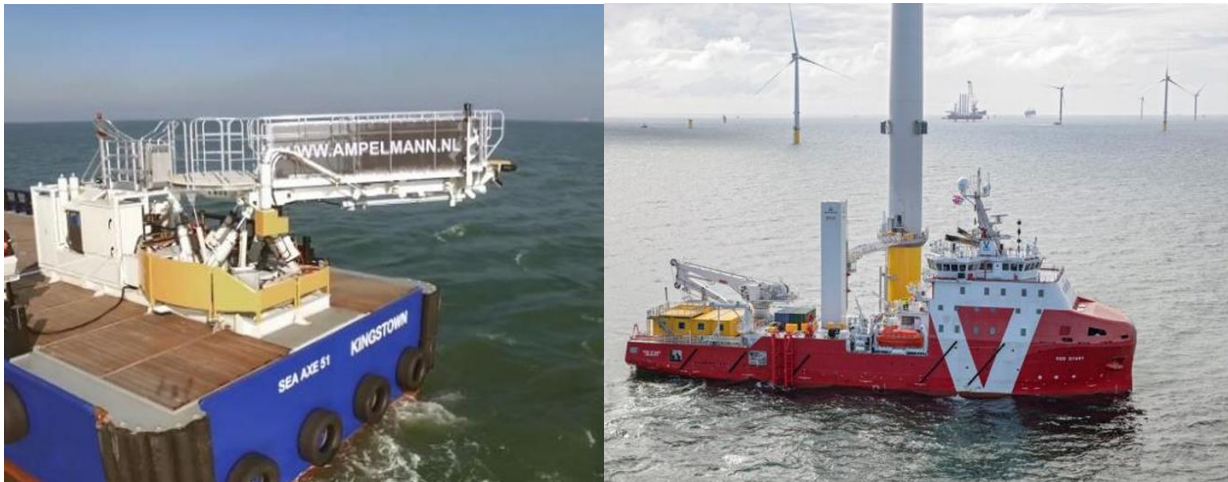


Abbildung 11: Aktiv bewegungskompensierte Gangway (links) [40]; SOV (rechts) [40]

Mit steigender Entfernung der WEA zur Küste sinkt der Nutzen der CTVs, da die Fahrtzeiten größer werden und die tatsächliche Arbeitszeit der Techniker bei der Wartung geringer wird [40]. Bei Entfernungen von bis zu 70 NM werden deswegen auch Helikopter für den Personaltransport verwendet [40]. Sie senken die benötigte Anreisezeit erhöhen, aber die Kosten des Transports [44]. Bei hohem Wellengang kommen sie auch bei geringeren Entfernungen zum Einsatz, um den Zugang zur Anlage sicher zu ermöglichen und eine Belastung des Personals durch Seekrankheit zu verringern [44]. Ab Entfernungen von etwa 35 NM werden hingegen auch bereits Service Operation Vessels (SOVs) eingesetzt [40]. Auf diesen können bis zu 60 Arbeiter mit den entsprechenden Ausrüstung bis zu zwei Wochen auf dem Meer stationiert sein [40]. Das Schiff befindet sich nahe der zu wartenden Anlagen und muss nicht zur Küste zurückfahren. Somit wird der Weg zur Anlage deutlich reduziert und die effektive Arbeitszeit der Techniker an der Anlage nimmt signifikant zu. Dies spart Personalkosten ein und beschleunigt die Wartung, wodurch die Anlagenverfügbarkeit steigt. Die SOV sind mit bewegungskompensierten Gangways und teilweise auch mit bewegungskompensierten Kränen ausgestattet, wie in Abbildung 11 rechts dargestellt [40]. Die Gangways auf SOVs können zum Teil neben dem Personal auch Bauteile unterhalb einer Tonne an Gewicht transportieren [40]. Der Kran ist für den Personal- und Bauteiltransport dieser Wartungsarten geeignet. Die SOVs sind erheblich größer als CTVs, weshalb sie weniger anfällig für den Wellengang sind und eine direkte Verbindung zwischen TP-Plattform und SOV möglich ist. Dies erhöht die Anlagenzugänglichkeit mit den SOVs gegenüber den CTVs. Jedoch sind die täglichen Kosten der SOVs bis zu zehnmal höher als bei CTVs und die Geschwindigkeit der SOVs ist deutlich geringer, sodass ein Nachteil bei Wartungen von weit auseinanderliegenden WEA besteht [44]. Die Zusammenhänge zwischen Küstenentfernung, Kosten und Transportmittel werden in Abbildung 12 veranschaulicht [40].

Anstatt einer mobilen Operationsbasis werden auch ortsgebundene Konzepte durchgeführt. Diese Operationsbasen sind offshore Plattformen, welche mit einem fixen oder einem schwimmendem Fundament ausgeführt werden können [44]. Sie erfüllen wie ein SOV die Funktion, die Arbeiter für einen Zeitraum von bis zu zwei Wochen an einem zum Wartungsort näherem Standort unterzubringen. In der Regel wird der Transport zur Basis und zu den WEA, aber von CTVs oder Hubschraubern durchgeführt, sodass dieser schneller als bei SOVs abläuft. Es können 30 bis 40 Angestellte auf einer Basis untergebracht werden. Durch die konstante Platzierung der Basen steigen die Kosten gegenüber den SOVs jedoch erheblich. Die Verwendung dieser Operationsbasen rechnet sich nur unter annähernd konstanter Stationierung von Technikern vor Ort. Somit finden sie vermehrt Anwendung in der Ölindustrie als in der Windenergie.

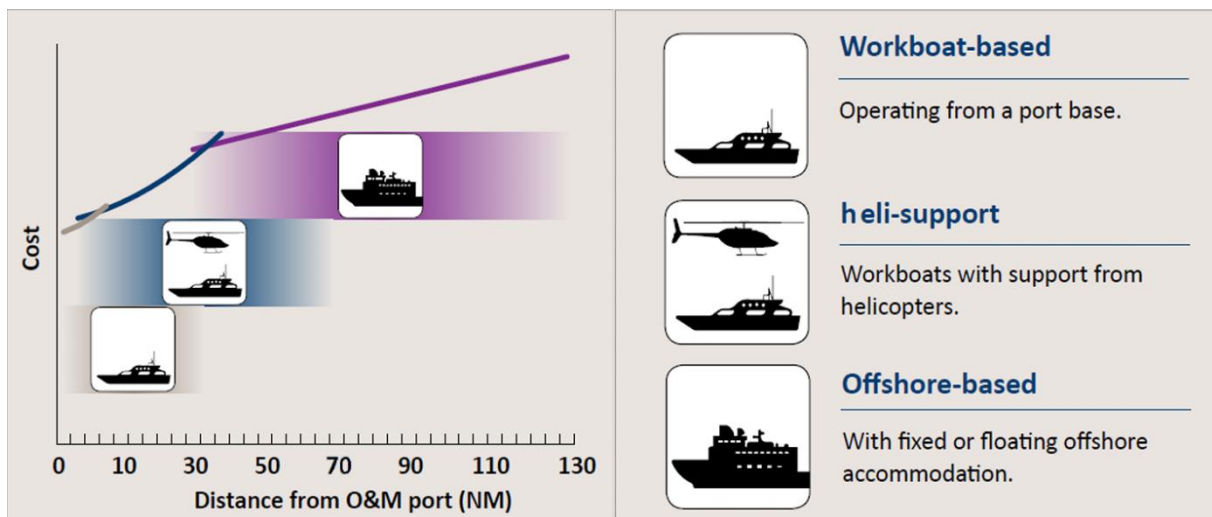


Abbildung 12: Personaltransport in Abhängigkeit der Küstenentfernung [40]

Der weitere Ablauf der Inspektionen, Wartungen und geringfügigen Reparaturen ist analog zu den onshore WEA. Mit Ausnahme, dass die Unterwasserstrukturen, wie Fundament, Schwimmplattform, Verankerung und Stromleitungen, von Drohnen oder im Ausnahmefall auch von Tauchern gewartet werden müssen [27].

Die umfangreichen Wartungen erfordern weiter spezialisierte Schiffe, um den Austausch von Teilen auf See vornehmen zu können. Aus Zeit und Sicherheitsgründen, werden die meisten Bauteile direkt vor Ort ersetzt und die ausgetauschten Bauteile werden zur Küste gebracht, wo sie dann gewartet werden [40]. Die bewegungskompensierte Kräne auf SOVs können im besten Fall bei signifikanten Wellenhöhen von bis zu 4,5 m und einer Windgeschwindigkeit von bis zu 25 m/s annähernd 40 t auf maximal 40 m Höhe über dem Schiffdeck heben [40]. Dies reicht, um einige Bauteile auf die Plattform des TP zu heben. Jedoch liegt im Vergleich bei der NREL-Referenzwindenergieanlage mit 15 MW Nennleistung das Gewicht eines 117 m langen Rotorblattes bei 65,25 t [46]. Zudem liegt die Nabhöhe bei 150 m und die Gondel der WEA ohne Rotor wiegt 820,8 t.



Abbildung 13: JUV (links) [51]; Kranschiff (rechts) [52]

Zur Bewältigung dieser Art von Hubgewichten und Hubhöhen werden Jack Up Vessels (JUV) und Kranschiffe genutzt. Die JUVs sind Kranschiffe oder Schwimmplattformen mit Kränen, welche über vertikal verfahrbare Stelzen verfügen [47]. JUVs besitzen entweder einen eigenen Antrieb oder werden von Schleppschiffen bewegt. Während der Fahrt zur WEA sind die Stelzen auf eine Position oberhalb der Wasseroberfläche verfahren, um den Wasserwiderstand und wirkende Kräfte in der Bewegung zu verringern. An der WEA angekommen werden die Stelzen auf den Meeresboden herabgesenkt, bis sie einen festen Stand haben und anschließend hebt sich das Schiff anhand der Stelzen über die Wasseroberfläche. Durch diese Positionierung des Schiffes und der Stelzen, ist das Schiff nicht mehr anfällig für den Wellengang, weshalb die Schwankungen des Schiffes erheblich reduziert sind. Zudem kann die Belastung durch gehobene Massen am Kran durch die Stelzen in den Boden übertragen werden und muss nicht über die Wasserverdrängung des Schiffes kompensiert werden [48]. Dies ermöglicht eine erhöhte Sicherheit beim Einsatz des Krans. JUVs können zurzeit nur bei einer Wassertiefe von maximal 130 m eingesetzt werden [47]. Bei einer mittleren Wassertiefe von 95 m in der Nordsee genügen die JUVs für einen Großteil der Flächen, besonders da WEA momentan eher in flacheren Gewässern gebaut werden [49]. Jedoch sind die JUVs für weite Teile des Meeres nicht einsatzfähig. Besonders die Verwendung an Schwimmplattformen ist problematisch, da diese vor allem für tiefe Meerestiefen über 100 m ausgelegt werden [48]. Kranschiffe sind Schiffe, welche mit einem oder mehreren Kränen ausgestattet sind. Der Aufbau, die Größe und das verdrängte Wasservolumen der Schiffe sind darauf ausgelegt die durch den Kranbetrieb wirkende Belastungen aufnehmen zu können, ohne die sichere Ausführung der Tätigkeit zu beeinflussen. Je nach Anwendung sind die Schiffe also unterschiedlich ausgelegt. Für offshore Wind Operationen sind dies Schiffe darauf ausgelegt mehrere WEA gleichzeitig transportieren und aufbauen zu können. Sie weisen hierfür eine Länge von um die 180 m auf [50]. Abbildung 13 zeigt jeweils ein Beispiel eines JUV links [51] und eines Kranschiffes rechts [52].

Die Kräne eines für moderne WEA ausgelegten JUVs können ein Hubgewichte zwischen 800 t und 1.500 t bewegen. Die Kräne auf einem für WEA ausgelegten Kranschiff sind hingegen eher für Bereiche zwischen 3.000 t und 20.000 t Hubgewicht ausgelegt. Bei dem üblicherweise auftretenden Mietverhältnis dieser Schiffe, liegt der Tagespreis der JUVs bei 150.000 \$US bis 250.000 \$US, während die Kranschiffe täglich zwischen 280.000 \$US und 500.000 \$US kosten [48]. Für beide dieser Schiffsarten liegen Wartezeiten von 30 Tagen vor, bis ein Schiff verfügbar ist [53]. Zudem ist der Einsatz wie bei CTVs und SOVs an die Wetterbedingungen gebunden, weshalb es eine erhebliche Planung erfordert, um einen passenden Termin für die gewünschte Operation zu finden und ein geeignetes Schiff für diesen Zeitraum zu mieten. Aufgrund der höheren Kosten und der größeren Auslegung werden die Kranschiffe eher für größere Aufgaben, wie die Installation eines gesamten Windparks genutzt und nicht für die Wartung der Anlagen. Die JUVs sind die bevorzugte Variante bei umfangreichen Wartungsarbeiten. Zurzeit können sie in den Wassertiefen der aktuell eingesetzten WEA operieren [54]. Die Schwimmplattformen sind noch nicht genügend technisch entwickelt und etabliert. Sie sind noch zu wenig marktpäsent, um eine speziell angepasste Lösung auf dem Markt zu erzwingen. Bei der Konzeptionierung von schwimmenden WEA mit höheren Nennleistungen von 12 MW und aufwärts, die in tiefen Gewässern liegen und durch ihre Höhe und Gewicht den Einsatz eines kostengünstigen Kranschiffes verhindern, wird für umfangreiche Wartung damit geplant die Anlagen mit einem Schleppschiff in einen Hafen zu ziehen [48]. Die Wartung wird dann von Land aus ausgeführt. Die Nutzung eines integrierten Krans oder der selbsterrichtenden Kletterkräne aus Kapitel 2.3.2 wird jedoch vermehrt in Betracht gezogen. Die MRWEA benötigen diese großen Wartungsschiffe nicht zwangsläufig und sparen somit Kosten und Wartezeiten ein. Daher kann der umfangreiche Wartungseinsatz besser geplant werden als bei ERWEA.

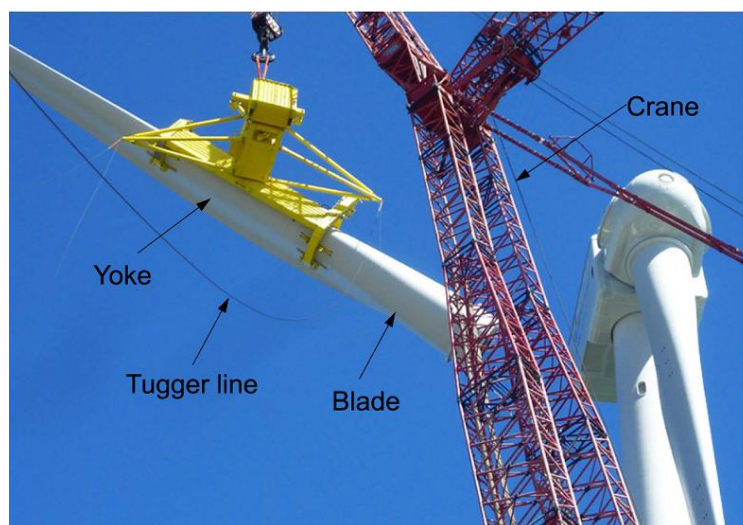


Abbildung 14: Zuggeschirr zur Montage eines Rotorblattes [48]

Die Schwankungen der Schiffe und der WEA sorgen besonders bei hohen Anlagen für hohe transversale Bewegungen der Bauteile und Anlagen. Die Nutzung von bewegungskompensierenden Kränen und JUVs minimiert diese Schwankungen jedoch und ermöglicht ein effizientes und sicheres Arbeiten an den WEA [48]. Schwimmplattformen stellen hierbei ein größeres Risiko dar, da WEA auf ihnen stärker durch die Wellen ins Schwanken gebracht werden und die Bewegung zwischen der Anlage und dem krangeführten Bauteil stark zunimmt [27]. Die Wetterbedingungen, unter denen eine Wartung an schwimmenden WEA vorgenommen werden kann liegen deshalb bei geringeren signifikanten Wellenhöhen, aber die Wartung ist weiterhin durchführbar [27]. Neben den welleninduzierten Bewegungen der Teile kommt es weiterhin durch den Wind zur Auslenkung der Bauteile. Vor allem beim Ab- und Anmontieren von Rotorblättern, werden dies durch ihr Profil durch den Wind beeinflusst. Dieses Problem tritt auch im onshore Bereich auf, aber da im offshore Bereich konstantere und höhere Windgeschwindigkeiten auftreten, die Schwankungen durch Wellen auftreten und tendenziell größere WEA mit längeren Rotorblättern verbaut werden, ist die Windablenkung im offshore Bereich kritischer zu betrachten [27]. Je länger das Rotorblatt ist, desto schwieriger ist es, es mit der richtigen Ausrichtung in die korrekte Position zu bewegen. Für die Anbringung einzelner Rotorblätter wird ein spezielles Zuggeschirr an dem Rotorblatt angebracht, welches die Ausrichtung von diesem ermöglicht. Zusätzlich sind Hilfsseile nötig, um die Bewegungen zu lenken. Der Austausch einzelner Rotorblätter ist ein riskantes Manöver und oftmals wird es vermieden es offshore durchzuführen. Stattdessen wird der gesamte Rotor ersetzt. Ein Beispiel für ein verwendetes Zuggeschirr wird in Abbildung 14 dargestellt [48].

2.3.3 Integrierte Wartungskonzepte an MRWEA

Bei der Nutzung integrierter Wartungskonzepte, sind alle nötigen Transportsysteme an der WEA angebracht. Hierbei wird vor Allem das Transportsystem für umfangreiche Reparaturen betrachtet, da die restlichen Transportsysteme zum aktuellen Zeitpunkt meist bereits integrierte Systeme sind.

Bei integrierten Transportsystemen für umfangreiche Wartungen besteht keine Notwendigkeit ein zusätzliches Transportsystem wie einen Kran oder im offshore Bereich ein Kranschiff oder JUV zu der WEA zu bewegen. Dies spart nicht nur den Transportweg dieser Transportsysteme, sondern auch die Zeiten zum Errichten der Anlagen vor Ort. Zudem sind besonders die offshore Kransysteme oft ausgelastet und erfordern zusätzliche Wartezeiten, bis sie zur Verfügung stehen. Bei integrierten Systemen müssen lediglich die Wartungsteile zur WEA transportiert werden. Besonders im offshore Bereich können somit kleiner Transportschiffe genutzt werden, die eine höhere Verfügbarkeit aufweisen und schneller fahren können.

Durch die Befestigung der integrierten Transportsystem an der Tragestruktur der WEA, ist die Stabilität der Anlage in der Höhe der WEA gegeben und die erzielbare Wartungshöhe sind bisher immer ausreichend für die entsprechenden Anlagen [37]. Das Erreichen der nötigen Wartungshöhe oberhalb der Nabe stellt für externen Transportsystem an hohen WEA teilweise ein Problem dar. Weiterhin treten zwischen WEA und externer Wartungsanlage Schwankungen auf, die grade in hohen Einsatzbereichen ein Gefahrenpotential ergeben. Dies trifft besonders bei Kranschiffen und WEA auf Schwimmplattformen zu, da diese beide von dem Wellengang beeinflusst werden [27]. Bei integrierten System führt das Transportsystem dieselbe Schwankung wie die WEA durch, da es an ihr befestigt ist. Hierdurch entsteht eine geringere Relativbewegung zwischen Transportsystem und Einsatzort. Bei zu starken Schwankungen, wie bei schlechten Wetterbedingungen an einer schwimmenden WEA ist die absolute Systemschwankung jedoch weiterhin zu hoch für einen Einsatz der integrierten Systeme.

Die dauerhafte Platzierung eines Transportsystem an der WEA stellt einen erhöhten Kostenpunkt im Vergleich zur Nutzung eines Transportsystems für mehrere WEA dar. Die Kosten des integrierten Systems sind abhängig von den Anforderungen an das System mit dem Hauptkostentreibers des maximalen Hubgewichts. Der Hauptkostentreiber externer Transportsystem ist hingegen der Transport dieser Systeme zur WEA [53]. Somit ist eine Anwendung integrierter Transportsysteme an küstenfernen Offshore WEA sinnvoller, da hier hohe Transportkosten für das Wartungssystem anfallen. Zudem sparen MRWEA weitere Kosten ein, indem kleinere Bauteile verwendet werden. Diese weisen ein geringeres Gewicht auf, sodass das integrierte System ein geringeres maximal Hubgewicht vorweisen muss. Weiterhin können die Bauteile der MRWEA platzsparender als Bauteiler einer ERWEA transportiert werden, womit eine Nutzung kleinerer und günstigerer Transportmittel ermöglicht wird.

Die integrierten Transportsystem für umfangreiche Reparaturen befinden sich momentan in der Entwicklungsphase und eine praktische Anwendung auf dem freien Markt ist noch nicht üblich [55]. Bei Betrachtung integrierter Transportkonzepte wird zurzeit meistens von integrierten Kränen ausgegangen. An ERWEA ergibt dies einen Aufbau ähnlich, der Selbstaufbauenden Kräne in Kapitel 2.3.1. Jedoch wird das selbstaufbauende System gegenüber dem integrierten System bevorzugt, da es die oben genannten Vorteile von externen und integrierten Kränen an ERWEA kombiniert. Weshalb die Entwicklung integrierter Systeme an ERWEA nicht stark vorangetrieben wird. Wie oberhalb beschrieben wird der Vorteil integrierter Kransystem bei MRWEA größer eingeschätzt als bei ERWEA, sodass diese bei hohen Rotorzahlen bereits mit integrierten Systemen konzeptioniert werden [55].

An MRWEA werden die Krankonzepte in zentral und dezentrale Konzepte unterteilt [55]. Bei den zentralen Konzepten ist es einem zentralen Kran möglich, jedes nötige Bauteil zu erreichen. Für dezentrale Konzepte werden mehrere Kräne zum Erreichen der Bauteile verwendet.

Der Kran eines zentralen Konzepts wird hierfür oberhalb an der Tragstruktur angebracht, sodass die obersten Rotoren erreicht werden können. Es handelt sich entweder um einen Schwenkkran, der von einer fixen Mittelposition allen Rotoren ansteuern kann [55]. Andererseits kann der Kran auf einem Schienensystem horizontal verfahren werden, um die Erreichbarkeit der Bauteile zu erhöhen. Die Art des Krans ist hierbei flexibler. Es kann ein gewöhnlicher Hubkran, ein Portalkran, ein Schwenkkran oder weitere Kräne verwendet werden [55]. Ein nicht verfahrbarer Schwenkkran muss aufgrund des hohen auftretenden Drehmoments, größer als ein verfahrbarer Kran ausgelegt werden, was die Kosten erhöht [55]. Der verfahrbare Kran benötigt jedoch ein Schienensystem, was ebenfalls die Kosten anhebt. Durch die Schiene lässt sich das Lastmoment nicht auf die Tragstruktur übertragen, weshalb ein Gegengewicht dieses Moment ausgleichen muss [55]. Zudem stellt das Verfahren des Kran auf oberster Ebene ein signifikante Verteilung des Schwerpunkts dar, die vor allem bei schwimmenden Anlagen in der Auslegung berücksichtigt werden muss. Die Positionierung der Kräne auf der obersten Ebene der Tragstruktur sorgt weiterhin dafür, dass die auf den Kran wirkenden Schwankungen höher ausfallen und dies ein zusätzliches Risiko für niedrigere Bauteile darstellt, die mit einem niedrigeren Kran erreicht werden könnten. Zudem müssen aus Sicherheitsgründen alle Rotoren bei der Wartung abgeschaltet werden, an denen das Seil des Krans und das bewegte Bauteil in einer unsicheren Entfernung verläuft [55]. Somit muss bei der zentralen Wartung mindestens eine gesamte Spalte an Rotoren abgeschaltet werden oder der Kranarm weiter ausgefahren werden, was das wirkende Drehmoment erhöht und die Befestigung der Bauteile am Kran erschwert.

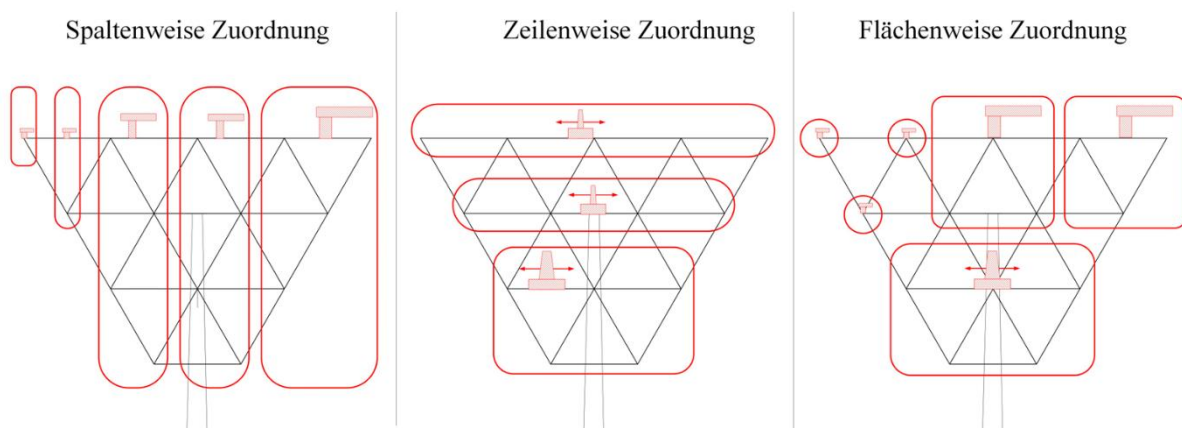
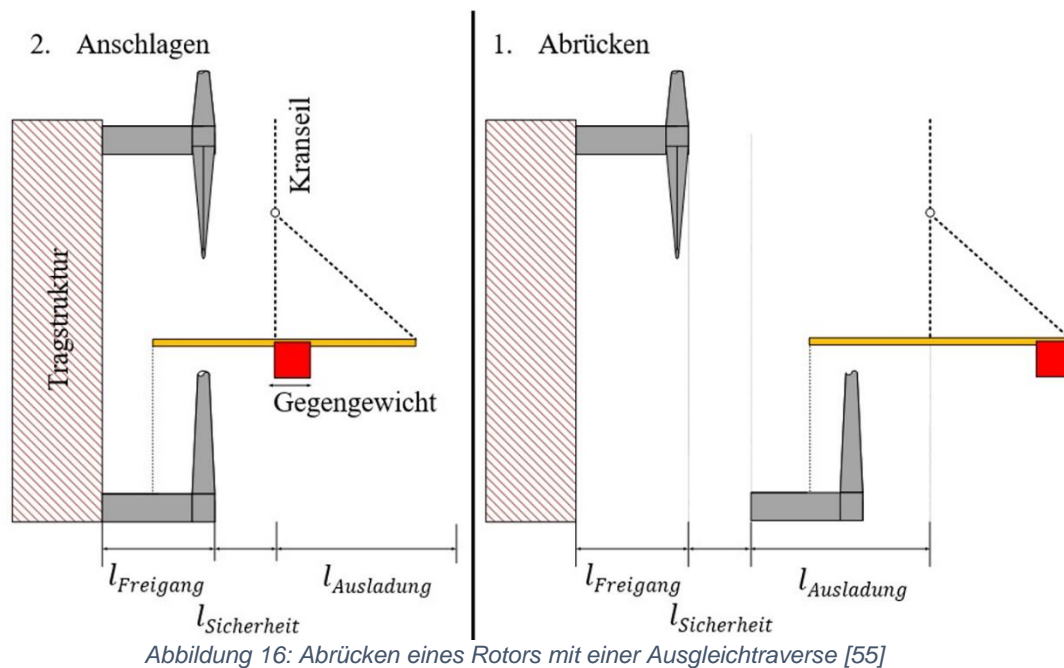


Abbildung 15: Spaltweise (links), zeilenweise (mittig) und flächenweise Zuordnung (rechts) dezentraler Krankonzepte einer MRWEA [55]

Bei einem dezentralen Krankonzept variiert die Anzahl der Kräne, je nachdem wie viele Rotoren die einzelnen Kräne in welchen Sektoren der MRWEA erreichen können. Die Sektoren können in Spalten, Zeilen oder Flächen eingeteilt sein, wie in Abbildung 15 veranschaulicht [55]. Eine Spaltweisezuordnung von Rotoren zu einem Kran bedeutet, dass ein Kran eine oder mehrere Spalten an Rotoren der MRWEA erreichen kann. Dies kann mit einem festen Kran auf der obersten Ebene der Tragestruktur erzielt werden, welcher entweder fixiert nur eine Spalte an Rotoren transportieren kann oder mit einem Schwenkarm eine Mehrzahl an Spalten abdeckt. Diese Umsetzung weist ähnliche Probleme wie die zentrale Anordnung auf, nur das keine beweglichen Kranteile verwendet werden müssen und ein kürzerer Hebelarm auftritt. Die vertikale Anordnung der Rotoren aus Kapitel 2.2 würde einen Spaltweise verfahrbaren Kran ermöglichen, der mit einem Schienensystem vertikal bewegbar ist. Hierdurch könnten die Rotoren, die sich oberhalb des zu wartenden Rotors befinden, während der Wartung weiter betrieben werden. Zudem können die, durch die Höhendifferenz von Kran und Bauteil verstärkten Schwankungen der Bauteile minimiert werden. Jedoch ist eine vertikale Bewegung aufwendiger als eine horizontale und es gibt zurzeit keinen detaillierten Konzepte, welche für diesen Fall untersucht oder ausgelegt sind.

Die zeilenweise Zuordnung von Rotoren zu einem Kran wird ähnlich dem zentralen Konzept durch einen horizontal verfahrbaren Kran oder einen Schwenkkran umgesetzt [55]. Dieser Kran ist für die Wartung einer definierten Anzahl von Zeilen an Rotoren unterhalb seiner Position zu nutzen. Nachdem die Anzahl an Reihen überschritten ist, ist ein weiterer Kran positioniert, der die nächsten Zeilen abdeckt. Dies vermindert genannten Probleme vom weiteren Betrieb der Rotoren und der Schwankungen der Bauteile.

Eine flächenweise Abdeckung der Rotoren stellt eine Kombination aus spaltweiser und zeilenweiser Zuordnung dar. Sie bietet je nach Ausführung dieselben Vorteile wie diese und kann auf die gleichen weisen umgesetzt werden. Es könnte sogar ein Kran pro Rotor verwendet werden [55]. Ein allgemeiner Vorteil des dezentralen Konzepts ist die Möglichkeit zeitgleich mehrere Anlagenteil mit einem Kran warten zu können, womit Zeit eingespart werden kann [55]. Die Nachteile sind hingegen die erhöhten Kosten und das erhöhte Gewicht durch die Verwendung einer Mehrzahl an Kränen [55]. Zudem kommt es durch die größere Anzahl an Kränen zur einer Erhöhung des Strömungswiderstandes der MRWEA. Dieser sollte nicht allzu hoch ausfallen und wurde noch nicht genauer untersucht, weshalb er des Weiteren nicht behandelt wird.



Integrierte Kräne an einer MRWEA, ob zentral oder bei einigen dezentralen Konzepten, weisen das Problem auf, dass teilweise weitere Rotoren zwischen dem Kran und dem zu wartenden Kran liegen. Hierdurch können diese Rotoren nicht direkt an das Kranseil aufgehängt werden, da sich das Seil in den anderen Rotoren verfangen könnte. Der Kranarm muss weiter ausgefahren werden, sodass das Seil im sicheren Abstand vor den weiteren Rotoren verläuft [55]. Würde man den Rotor ohne weitere Maßnahmen an dem Seil aufhängen, würde der Rotor anfangen an dem Seil zu schwingen [55]. Um dies zu vermeiden kann ein weiterer Aufhängepunkt an der MRWEA vorliegen an dem der Rotor zusätzlich gesichert wird, sodass die Schwingbewegung des Rotors abgefangen wird [55]. Dies erhöht den Arbeitsaufwand der Arbeiter vor Ort und verlängert den Wartungsprozess. Außerdem kann eine Ausgleichstraverse eingesetzt werden [55]. Die Traverse wird am Kranseil angebracht. An ihr befindet sich ein verfahrbares Gegengewicht, welches das Drehmoment des Rotors ausgleichen kann. Hiermit lässt sich der Rotor an der Traverse befestigen, ohne dass das Seil sich in einem Rotor verfangen kann oder ein Schwingen auftritt. Danach kann der Kranarm ausgefahren werden, um den Rotor von der Anlage abzurücken. Der Ablauf wird in Abbildung 16 verdeutlicht [55]. Diese Methode erfordert zwar keine weitere Arbeit der Angestellten, aber das Hubgewicht des eingesetzten Krans muss um das Gewicht der Ausgleichstraverse erhöht werden und der Kran wirkt durch das Gewicht eine höheres Drehmoment auf die Tragestruktur.

Neben der Verwendung von Kränen bei integrierten Transportsystemen hat der Hersteller Wind Catching Systems ein Konzept erarbeitet, bei dem ein vertikal verfahrbarer Lift eingesetzt werden soll [20]. Dieser Lift soll die einzelnen Bauteile verladen können und soll zudem mit einem Greifarm ausgerüstet werden. Der Greifarm soll in der Lage sein, die einzelnen

Rotorblätter und weiterer Bauteile zu greifen und zu bewegen. Durch dieses System könnten alle anderen Rotoren während einer Wartung weiter betrieben werden. Zudem ist diese Art der Wartung geringfügiger anfällig für die Schwankungen der Anlage als ein Kran, da eine feste Verbindung zwischen Anlage und Bauteil besteht. Das Konzept ist jedoch noch nicht weitreichend erforscht [56]. Es setzt die Verwendung einer vertikalen Tragestrukturanordnung voraus. Weiterhin zeigt die Präsentation des Konzept eine Wartung von einzelnen Bauteilen, jedoch wird kein Austausch einer ganzen Rotor-Gondel-Baugruppe möglich sein, sodass die Wartungszeiten bei einigen Fällen höher als beim Kran ausfallen werden. Ein Konzeptbild dieses Prinzips wird in Abbildung 4 gezeigt [20].

Weiterhin gibt es ein Konzept von WindSpider, bei dem ein Greifarm mit dem Rotorblatt an einer Tragestruktur verfährt, ohne den Einsatz eines Krans zu benötigen [36]. Zudem kann man noch neuere Konzepte in Betracht ziehen, welche noch nicht für die Windenergie ausgelegt sind. Zum Beispiel kann man einen an gespannten Seilen verfahrbaren Trageroboter integriert an der Tragestruktur zum Bauteiltransport oder für Wartungsarbeiten nutzen [57].

3 Erstellung der Konzepte

Das Wartungskonzept soll für eine offshore MRWEA auf einer Schwimmplattform konzipiert werden. Diese MRWEA besitzt eine Tragestruktur mit direkter Verbindung an die Schwimmplattform. Es wird auf eine Turmstruktur verzichtet. Bei den einzelnen 3-Blatt-Rotoren handelt es sich um HAWT mit Getriebe und Pitchsteuerung, welche eine Nennleistung von 1 MW besitzen. Die Gesamte Nennleistung der MRWEA beträgt 45 MW. Die Wartungskonzepte sollen entweder für eine horizontale Tragestrukturanordnung oder eine vertikale Tragestrukturanordnung genutzt werden können. Es sollen integrierte Wartungssysteme verwendet werden. Das Wartungskonzept soll für einen küstenentfernten Standort mit einer Wassertiefe höher als 200 m ausgelegt werden. Diese MRWEA Aufstellung wird aufgrund der in Kapitel 1 und 2 genannten Vorteile von MRWEA und Schwimmplattformen verwendet. Das weitere Kapitel behandelt die Erstellung von für diese MRWEA geeignete Wartungskonzepte.

3.1 Abschätzung der Bauteilmassen und Bauteildimensionen

Zur korrekten Auslegung der Wartungskonzepte muss für die einzelnen Rotor-Gondelbaugruppen der Rotordurchmesser, das Rotorgewicht und das Gewicht der Gondel bestimmt werden. Der Rotordurchmesser bestimmt den Abstand der Rotoren zueinander, was die MRWEA-Anordnung beeinflusst. Die Gewichte der Bauteile sind ein wichtige Größe zur Auslegung der Hubkapazität der Transporteinheiten.

Die Werte für diese Parameter können per Umrechnung von Referenzanlagen berechnet werden. Der Rotordurchmesser lässt sich von einem Rotor zu einem Rotor mit einer anderen Nennleistung umrechnen, indem man für Formel 1 davon ausgeht, dass die Differenz der Leistung nur durch eine Änderung der Fläche entsteht. Stellt man die Formel dann um und löst die Fläche nach dem Durchmesser auf, ergibt sich die Formel 6 [55].

$$d_1 = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} d_2 \quad (6)$$

Um die Abweichung der Berechnung möglichst gering zu halten, wird ein Rotor mit zum Zielwert naheliegender Nennleistung genutzt. Hier wird die NREL 1,5 MW Referenzwindenergieanlage aus dem Jahr 2018 benutzt. Sie weist einen Rotordurchmesser von 70 m auf [58]. Das Gewicht des Rotors ist 32.167 kg und das der Gondel 52.839 kg. Ein einzelnes Rotorblatt wiegt 4.336 kg. Unter Einsetzen des Rotordurchmessers und der

Nennleistungen, wie in Formel 7, ergibt sich für die 1 MW Rotoren ein Durchmesser von 57,15 m.

$$\sqrt{\frac{1 \text{ MW}}{1,5 \text{ MW}}} 70 \text{ m} = 57,15 \text{ m} \quad (7)$$

Die Verwendung des Skalierungsgesetzes aus Formel 2 ermöglicht eine grobe Abschätzung der Masse der 1 MW Rotoren. Das Masseverhältnis von dem einen Rotor zum anderen ähnelt dem Verhältnis beider kubischen Rotordurchmesser. Durch Umstellung ergibt sich Formel 8 [55]. Nach einsetzen in Formel 9 wird das Gewicht der 1 MW Rotoren auf 17.505 kg berechnet. Die Gondel wiegt nach Formel 10 in etwa 28.755 kg. Die Berechnung in Formel 11 ergibt ein Rotorblattgewicht von 2.360 kg.

$$m_1 = \frac{d_1^3}{d_2^3} m_2 \quad (8)$$

$$\frac{57,15^3 \text{ m}^3}{70^3 \text{ m}^3} 32.167 \text{ kg} = 17.505 \text{ kg} \quad (9)$$

$$\frac{57,15^3 \text{ m}^3}{70^3 \text{ m}^3} 52.839 \text{ kg} = 28.755 \text{ kg} \quad (10)$$

$$\frac{57,15^3 \text{ m}^3}{70^3 \text{ m}^3} 4.336 \text{ kg} = 2.360 \text{ kg} \quad (11)$$

Eine Recherche nach realen 1 MW 3-Blatt-Rotoren mit Getriebestrang ergibt veraltete Modelle, welche mit Stallregelung statt Pitchregelung betrieben werden. Die betrachteten Anlagen sind die AN BONUS 1 MW/54 [59], die Nordic N1000 [60] und die ELKRAFT Avedøre 1MW [61]. Bei ihnen liegt der Rotordurchmesser in ein Bereich von 50 m bis 59 m. Das Rotorgewicht beträgt etwa 25 t, die Gondel wiegt 40 t und die einzelnen Rotorblätter wiegen zwischen 3,6 t und 4,2 t. Diese Werte sind mit älteren Materialien unter Stallregelung erzielt worden, während die NREL-Referenzanlagen moderne Techniken für ihre Prognosen einbezogen haben. Da die Referenzwerte jedoch nur theoretische Werte sind und diese mit einer Rechnung auf die gewünschte Nennleistung abgeschätzt werden, werden die berechneten Werte der 1 MW Rotoren an die Daten der Realanlagen angeglichen. Dies stellt die Durchführbarkeit des Konzepts sicher.

Die Berechneten Werte der 1 MW Rotoren werden um 15 % erhöht, um sie an die Daten der veralteten Anlagen anzugleichen. Der Rotordurchmesser ist hiervon nicht betroffen. Hieraus ergibt sich für die verwendeten Rotoren ein Rotordurchmesser von 57,15 m, ein Rotorgewicht von 20.131 kg, ein Gondelgewicht von 33.068 kg und ein Rotorblattgewicht von 2.714 kg.

3.2 Anforderungsliste

Die Anforderungsliste stellt die Anforderungen an die Wartungssysteme tabellarisch, in Tabelle 1, dar.

Die Allgemeinen Anforderungen sind für das ganze System gültig. Im Bereich Personaltransport werden die Anforderungen an Teilsysteme definiert, die zum Transport oder der Unterbringung von Personen genutzt werden. Die Kategorie Inspektion beschreibt Anforderungen an für die Inspektion genutzte Systeme. Der Kleinteiltransport umfasst Anforderungen an Systeme, welche für den Transport von Bauteilen für die Wartung oder die geringfügige Reparatur benötigt werden. Die Anforderungen für den Großteiltransport gelten für die Teilsysteme, die für den Transport von Bauteilen für eine umfangreiche Reparatur genutzt werden.

Tabelle 1: Anforderungsliste

Funktion	Nr.	Anforderung
Allgemein	1	Die MRWEA soll eine Nennleistung von 45 MW aufweisen.
	2	Die MRWEA soll sich auf einer Schwimmplattform befinden.
	3	Die MRWEA soll eine Tragestruktur besitzen, die ohne Turmstruktur mit der Schwimmplattform verbunden ist.
	4	Es sollen HAWT 3-Blatt-Rotoren mit Getriebe und Pitchsteuerung verwendet werden.
	5	Die einzelnen Rotoren der MRWEA sollen 1 MW Nennleistung besitzen.
	6	Die MRWEA soll küstenfern bei einer Wassertiefe größer als 200 m positioniert werden.
	7	Die Sicherheit der Arbeiter muss, während der Arbeiten, gewährleistet sein.
	8	Die Anlagen sollen den Extremwetterbedingungen nach den Lastfällen der IEC 61400-1 bei der Windklasse 1B standhalten.
	9	Es muss ein Schutz gegen Umweltbedingungen vorliegen.
	10	Das Gesamtgewicht der Anlagen soll möglichst geringgehalten werden.
	11	Die Wartungsdauer soll möglichst gering ausfallen.
	12	Die Verfügbarkeit der MRWEA soll maximiert werden.
	13	Die Möglichkeit zur Wartung aller Bauteile muss gewährleistet sein.
	14	Die Kosten der Anlagen sollen möglichst gering sein.
	15	Die Wartungsanlagen sollten mit heutiger Technik umsetzbar sein.
	16	Die Wartungsanlagen sollen bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s einsatzfähig sein [62].

Funktion	Nr.	Anforderung
Allgemein	17	Die Wartungsanlagen sollen bei einer signifikanten Wellenhöhe von bis zu 2,5 m einsatzfähig sein [62].
	18	Die Wartungsanlagen sollen bei einer welleninduzierten Auslenkung von bis zu 8 m an dem höchsten Anlagenpunkt einsatzfähig sein [63].
	19	Die Wartungsanlagen dürfen die MRWEA nicht beschädigen.
	20	Die Wartungsanlagen dürfen die Stabilität der Schwimmplattform nicht beeinflussen.
	21	Die Notwendigkeit für Wege zur MRWEA sollten möglichst gering sein.
Personaltransport	22	Die Erreichbarkeit aller Wartungsorte muss gewährleistet sein.
	23	Die MRWEA muss sicher von einem CTV, SOV und von einem Helikopter aus, von dem Wartungspersonal, betreten werden können.
	24	Das Transportsystem muss redundant ausgelegt sein, falls das primäre System ausfällt.
	25	Im primären System sollen drei Personen inklusive kleiner Werkzeuge transportiert werden können.
	26	Im sekundären System soll eine Person transportiert werden können.
	27	Das Runterfallen des Personals muss verhindert werden.
	28	Das Einklemmen von Körperteilen oder Werkzeugen während des Transportes muss verhindert werden.
	29	Der Transportweg sollte möglichst gering sein.
	30	Der bewegungsinduzierter Schwindel oder Verletzungen des Personals soll vermieden werden. Die Beschleunigung während des Einsatzes darf $1,3 \frac{m}{s^2}$ nicht überschreiten [64].
	31	Ein starker Schubeffekt auf das Personal durch den Wind muss vermieden werden.
Inspektion	32	Die Erreichbarkeit aller Inspektionssorte muss regelmäßig gewährleistet sein.
	33	Das Runterfallen des Personals muss verhindert werden.
	34	Das Einklemmen von Körperteilen oder Werkzeugen während der Inspektion muss verhindert werden.
	35	Der bewegungsinduzierter Schwindel oder Verletzungen des Personals soll vermieden werden. Die Beschleunigung während des Einsatzes darf $1, 3 \frac{m}{s^2}$ nicht überschreiten [64].

Funktion	Nr.	Anforderung
Kleinteiltransport	36	Die Erreichbarkeit aller Wartungsorte muss gewährleistet sein.
	37	Die Bauteile müssen von einem CTV, SOV und von einem Helikopter aus auf den Kleinteiltransport geladen werden können.
	38	Es sollen Bauteil mit einem Gewicht von bis zu 50 Kg transportiert werden können [65].
	39	Es sollen Bauteil mit Maßen von bis zu 1 m x 1 m x 0,5 m transportiert werden können [65].
	40	Das Runterfallen der Bauteile muss verhindert werden.
	41	Das Einklemmen der Bauteile während des Transportes muss verhindert werden.
	42	Der Transportweg soll möglichst gering sein.
	43	Eine Schädigung der Bauteile muss verhindert werden.
	44	Eine Schädigung der MRWEA durch die Bauteile muss verhindert werden.
Großteiltransport	45	Die Erreichbarkeit aller Wartungsorte muss gewährleistet sein.
	46	Die Bauteile müssen von einem Transportschiff aus auf den Großteiltransport geladen werden können.
	47	Es sollen Rotorblätter mit einem Gewicht von 2.714 kg und einer Länge von 27,15 m transportiert werden können.
	48	Der Transport des Getriebes mit einem Gewicht von 22.000 kg soll berücksichtigt werden.
	49	Das Runterfallen der Bauteile muss verhindert werden.
	50	Das Einklemmen der Bauteile während des Transportes muss verhindert werden.
	51	Der Transportweg soll möglichst gering sein.
	52	Eine Schädigung der Bauteile muss verhindert werden.
	53	Eine Schädigung der MRWEA durch die Bauteile muss verhindert werden.
	54	Die Lebensdauer der Wartungsanlage sollte der Lebensdauer der MRWEA entsprechen.

3.3 Morphologischer Kasten

Der Morphologische Kasten wird in diesem Kapitel genutzt, um die verfügbaren Kombinationen an Transportsystemen für die Wartung möglichst umfangreich und bewertungsfrei aufzuzeigen. In ihm werden die verfügbaren Lösungen für die jeweiligen Transportprozesse untereinander aufgelistet, sodass eine Übersicht von kombinierbaren Systemen entsteht. Für den morphologischen Kasten sollen zuerst Konzepte von Transportmöglichkeiten verwendet werden, um die Komplexität von diesem gering zu halten und eine übersichtliche Vorauswahl treffen zu können. Die Spezifizierung der System findet in Kapitel 4.1 statt. Der morphologische Kasten wird in Tabelle 2 dargestellt.

Einer der betrachteten Transportprozesse ist der Antransport der Teile oder Personen zur MRWEA. Dieser Prozess ist wie in Kapitel 3.2 in die Unterfunktionen Kleinteiltransport, Großteiltransport und Personaltransport unterteilt. Die genannten Unterfunktionen können von einem einzelnen oder mehreren unterschiedlichen Systemen erfüllt werden. Wie in Kapitel 2.3.2 können hierfür CTVs, SOVs oder Lastschiffe verwendet werden. Für den Kleinteil- und den Personaltransport kann zudem ein Helikopter genutzt werden.

Die Übergabe vom Antransport zur MRWEA beschreibt den Übergang der Bauteile und Personen vom Schiff oder dem Helikopter auf die MRWEA. Wie der Antransport ist die Übergabe in die drei Unterfunktionen Kleinteile, Großteile und Personal unterteilt. In Kapitel 2.3.2 wird dieser Übergang genauer beschrieben. Die Gangway stellt einen brückenähnlichen Übergang zwischen Schiff und der Anlandestelle oder MRWEA-Plattform dar. Die MRWEA-Plattform ist die unterste Ebene der MRWEA und wird als äquivalent zum TP verwendet. Zudem kann es einen Weg von dem Hauptteil der MRWEA zu der Helikopterlandeplattform beschreiben. Personen können über die Gangway laufen. Leichte Bauteile können von dem Personal über die Gangway getragen werden [66]. Ansonsten können auf der Gangway Hubwagen, Rollwagen oder ein Förderband benutzt werden, um die Bauteile zu transportieren. Die Bauteile können weiterhin über einen Kran auf dem Transportschiff oder der MRWEA-Plattform zu dieser gehoben werden. Bei dem Antransport per SOV werden die Rotorblätter jedoch aus Platzgründen immer mit dem Kran zur MRWEA-Plattform gehoben und können nicht über die Gangway transportiert werden. Drohnen können genutzt werden, um leichte Bauteile zu transportieren. Bei dem Personal bestehen die Möglichkeiten, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, von der Anlandestelle des Schiffs per Leiter oder Aufzugsplattform auf die MRWEA-Plattform zu gelangen oder mit einem Kran heraufgezogen zu werden. Auf der Aufzugsplattform kann das Personal zudem Kleinbauteile mitführen.

Bauteile könnten auf der MRWEA gelagert werden, um bei einem Bauteiltransport zur Anlage ungenutzten Platz mit Ersatzteilen zu füllen und bei späteren Wartungen einen Bauteiltransport einsparen zu können. Hierbei könnten die Kleinteile, die Großteile oder beide Bauteilarten eingelagert werden. Für die Lagerung soll in diesem Rahmen nur der allgemeine Nutzen des Prozesses auf Kosten und Zeit untersucht werden, weshalb in dieser Arbeit nicht spezifisch auf die Anforderungen und Bauweisen von Lagern eingegangen wird.

Bei der Inspektion wird davon ausgegangen, dass nach dem Stand der Technik eine Echtzeitüberwachung der Elektrischen Systeme und Schwingungen vorliegt. Hiermit lassen sich die Wartungseinsätze planen, bevor ein akuter Schaden entsteht. Zudem werden regelmäßigen vor Ort Überprüfungen durchgeführt. Für die meisten dieser Inspektionen soll das Personal das entsprechende System über den vorgesehenen Personaltransportweg erreichen können. Ausnahmen hierzu bilden die Inspektion von Systemen unterhalb der Wasseroberfläche und Rotorblattinspektionen. Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, werden Unterwasserinspektion anhand von Drohnen durchgeführt oder im Ausnahmefall von Tauchern. Die Inspektion der Rotorblätter bietet mehrere Möglichkeiten, die im morphologischen Kasten festgehalten sind. Sie kann durch abseilendes Personal im Gurtzeug oder Personal in einem Wartungslift, wie in Abbildung 7, durchgeführt werden. Zudem könnte das Personal Flugdrohnen oder hochauflösende Kameras an der Tragestruktur einsetzen, um die Rotorblätter optisch zu inspizieren.

Die Wartungen und geringfügigen Reparaturen sollten, wie die Inspektion, an den meisten Systemen durch das Personal über den vorgesehenen Personaltransportweg erreicht und durchgeführt werden können. Unter dem Wasser werden Drohnen und in Ausnahmen Taucher für die Wartung genutzt. An dem Rotorblatt kann das Personal, wie für die Inspektion, in einem Wartungslift transportiert werden oder sich mit Hilfe eines Gurtzeugs abseilen. Weiterhin könnten wie in Kapitel 2.3.1 aufgezeigt Drohnen oder Wartungsroboter eingesetzt werden.

Der Kleinteiltransport stellt den Transport von Bauteilen für die Wartung und geringfügige Reparatur dar. Er wird in die Unterfunktionen des vertikalen und des horizontalen Transports unterteilt, wobei die beiden Unterfunktionen jedoch auch von einem einzelnen System durchgeführt werden können. Für die vertikale Bewegung kann ein Kran oder ein Aufzug verwendet werden. Die Verwendung eines schienengeführten Greifarms, ähnlich des Windspider Konzepts [36], oder einer Liftplattform, ähnlich dem Konzept von Wind Catching Systems [20], wäre auch möglich. Zuletzt könnten Drohnen für den Bauteiltransport genutzt werden, die sowohl eine vertikalen wie eine horizontalen Transport ausführen können. Der horizontale Transport lässt sich durch einen horizontal verlaufenden Laufsteg ermöglichen. Über diesen Laufsteg können die Bauteile durch das Personal transportiert werden. Zur

Lasterleichterung beim Personal könnten sie für den Transport auf dem Laufsteg zudem Roll- oder Hubwagen nutzen. Ein Förderband auf dem Laufsteg könnte auch für den Kleinteiltransport genutzt werden. Ein schienengeführter Wagen könnte auf dem Laufsteg als Erleichterung für das Personal benutzt werden. Mit eigenem Antrieb könnte der Schienenwagen zudem ohne einen Laufsteg entlang der Tragestruktur verfahren. Die Kleinteile könnten mit einem Seil an eine Schienenführung gehangen werden, an der sie zum Zielort verfahren werden. Dies lässt sich zudem mit einem kleinen Kransystem kombinieren, welches in die Schienenführung gehangen wird, sodass der Kran verfahrbar ist und sich für vertikale und horizontale Bewegungen eignet. Der Kran kann auch durch ein ausklappbares Gliedersystem horizontal verfahren werden [67]. Hierfür müssten jedoch mehrere Kransysteme eingesetzt werden, um die ganze Anlage erreichbar zu gestalten. Ein stationärer ausfahrbarer oder ausklappbarer Greifarm kann genutzt werden, weist aber wie der ausklappbare Kran die Notwendigkeit für mehrere Systeme auf. Der Greifarm könnte auf einen Rollwagen platziert werden oder in Schienen geführt werden, um ihm verfahrbar zu gestalten [68]. Eine horizontal verfahrbare Plattform könnte für den Bauteiltransport benutzt werden. Sie würde an der Tragestruktur verfahren werden. Dies lässt sich in der horizontalen Tragestrukturanordnung umsetzen, doch bei der vertikalen Tragestrukturanordnung, müsste die Plattform auch vertikal verfahrbar sein, da sie sich nur in der untersten Ebene der Tragestruktur horizontal bewegen kann. Zudem wäre ein weiteres Transportsystem auf der Plattform notwendig, um die letzte Strecke von der Plattformposition zu dem Wartungsort zu ermöglichen. Das Konzept von Wind Catching Systems beschreibt eine solche Plattform [20].

Die Bauteile, welche für die umfangreiche Reparatur benötigt werden, werden durch den Großteiltransport transportiert. Für den Großteiltransport liegen nur Konzepte vor, die die vertikale und horizontale Bewegung kombinieren. Zudem wäre ein Wechsel der Transportsystem in der Höhe auf der Anlage, wegen der Größe und dem Gewicht der Bauteile, ein Sicherheitsrisiko. Deshalb wird der Großteiltransport im Gegensatz zu dem Kleinteiltransport nicht in die beiden Bewegungsrichtungen als Unterfunktionen unterteilt. Die integrierten Transportsystem, die in Kapitel 2.3.3 beschrieben sind können für den Großteiltransport genutzt werden. Somit besteht die Möglichkeit eine Liftplattform mit integrierten Greifarm, einen an der Tragestruktur schienengeführten Greifarm oder die verschiedenen Arten von zentralen oder dezentralen Kränen zu nutzen. Für den horizontalen Transport kann unterstützend der Übergabemechanismus auf der MRWEA-Plattform genutzt.

Bei dem Personaltransport wird erneut in die Unterfunktionen vertikaler und horizontaler Transport unterteilt. Zudem wird ein redundantes analoges Transportsystem benötigt, dass selbst ein geringes Ausfallrisiko birgt und bei Ausfall des primären Personaltransportsystems genutzt werden kann. Der vertikale Personentransport kann durch die Verwendung von

Leitern, Aufzügen, Treppen und Liftplattformen ausgeführt werden. Hierbei stellen die Leitern und die Treppen zusätzlich ein ausfallsicheres Ersatzsystem dar. Das Bewegen der Personen mit einem Kran, wie für den Übergang auf die MRWEA, wird aus Sicherheitsgründen in der Höhe vermieden. Hierdurch stellt dies keine Option dar. Für den horizontalen Personaltransport kann ein Laufsteg verwendet werden. Dieser kann zur Erhöhung der Geschwindigkeit und Verringerung der Belastung auf das Personal mit einem Förderband, einem Rollwagen oder einem Schienenwagen ergänzt werden. Das Personal könnte zudem mit der zuvor beschriebenen horizontal verfahrbaren Plattform transportiert werden. Der Schienenwagen und die Plattform bieten, wie für den Kleinteiltransport, die Möglichkeit auf den Laufsteg zu verzichten. Jedoch ist der Laufsteg die einzige bestehende Lösung für das Ersatzsystem und muss somit verbaut werden.

Tabelle 2: Morphologischer Kasten

Prozess	Ausführungen										
Antransport Kleinteile	CTV	SOV	Lastschiff	Helikopter	-	-	-	-	-	-	-
Antransport Großteile	CTV	SOV	Lastschiff	-	-	-	-	-	-	-	-
Antransport Personal	CTV	SOV	Helikopter	-	-	-	-	-	-	-	-
Übergabe Kleinteile	Gangway Personal	Gangway Hub-wagen	Gangway Rollwagen	Gangway Förderband	Kran	Drohnen	Aufzug	-	-	-	-
Übergabe Großteile	Gangway Hub-wagen	Gangway Förder-band	Kran	-	-	-	-	-	-	-	-

Übergabe Personal	Leiter	Aufzug	Gangway	Kran Gurtzeug	Kran Gondel	-	-	-	-	-	-
Bauteillagerung	Lagerung Kleinteile	Lagerung Großteile	Lagerung aller Teile	Keine Lagerung	-	-	-	-	-	-	-
Inspektion	Personal Gurtzeug	Personal Wartungs-lift	Installierte Kameras	Drohnen	-	-	-	-	-	-	-
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Gurtzeug	Personal Wartungs-lift	Drohnen	Wartungs-roboter	-	-	-	-	-	-	-
Kleinteil-transport (Vertikal)	Aufzug	Kran	Greifarm verfahrbar	Drohnen	Lift-plattform	-	-	-	-	-	-
Kleinteil-transport (Horizontal)	Laufsteg Personal	Laufsteg Förder-band	Laufsteg Rollwagen	Laufsteg Hubwagen	Schienen-wagen	Schienen-führung hängend	Kran verfahrbar	Greif-arm stationär	Greif-arm verfahr-bar	Platt-form verfahr-bar	Drohnen

Großteil-transport	Zentraler Kran stationär	Zentraler Kran verfahrbar	Dezentrale Kräne spaltweise	Dezentrale Kräne reihenweise	Dezentrale Kräne flächenweise	Lift-plattform Greifarm	Greifarm schienen-geführt	-	-	-	-
Personal-transport (Vertikal)	Leiter	Aufzug	Treppe	Liftplattform	-	-	-	-	-	-	-
Personal-transport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg Förderband	Laufsteg Rollwagen	Schienen-wagen	Plattform verfahrbar	-	-	-	-	-	-
Ersatzpersonal-transport (Vertikal)	Leiter	Treppe	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ersatzpersonal-transport (Horizontal)	Laufsteg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.4 Variantenbewertung und Variantenwahl

Durch die Kombination der verschiedenen Systeme der Unterfunktionen im morphologischen Kasten kann eine sehr hohe Anzahl an möglichen Systemvarianten gebildet werden. Die Multiplikation der Anzahl an verfügbaren Lösung in den Unterfunktion des morphologischen Kastens miteinander ergibt eine Anzahl von 3,726 Milliarden unterschiedlichen Varianten, die gebildet werden könnten. Diese Anzahl an Varianten lässt sich nicht im Einzelnen untersuchen und es sind auch nicht alle Kombinationen sinnvolle Verbindungen von Einzelsystemen. Deshalb muss eine Vorauswahl an Varianten getroffen werden, welche anschließend durch eine grobe Bewertung auf eine auswertbare Anzahl begrenzt wird. In diesem Kapitel wird dieser Vorgang zur Bestimmung der weiter zu untersuchenden Varianten durchgeführt.

Tabelle 3: Bewertungskriterien

Nummer	Bewertungskriterium
1	Gewicht
2	Kosten
3	Geschwindigkeit
4	Wartungswege
5	Erreichbarkeit
6	Ausfallrate
7	Wetteranfälligkeit
8	Verfügbarkeit
9	Lebensdauer
10	Sicherheit
11	Umsetzbarkeit
12	Anlagenschwerpunkt
13	Funktionsintegration

Zunächst werden die Bewertungskriterien zur Beurteilung der Varianten festgelegt. Die Kriterien leiten sich aus den Anforderung aus der Anforderungsliste in Tabelle 1 ab. Sie werden in Tabelle 3 aufgelistet.

Das Gewicht bezieht sich auf das Gewicht der Wartungssysteme auf der Schwimmpattform. Mit erhöhter Masse muss die Schwimmpattform, dementsprechend ausgelegt werden, wodurch höhere Kosten anfallen. Somit ist ein geringeres Gewicht besser zu bewerten.

Die Kosten sind in dieser groben Bewertung auf die Investitionskosten oder die Mietkosten der Systeme begrenzt.

Ein weiteres Kriterium aus der Anforderungsliste ist eine geringe Wartungsdauer. Da diese sich jedoch in einer undetaillierten Betrachtung nicht präzise abschätzen lässt wird sie in die Unterpunkte Geschwindigkeit und Wartungswege unterteilt. Die Geschwindigkeit gibt an wie

schnell sich die einzelnen Systeme verfahren lassen. Unter den Wartungswegen wird betrachtet, ob ein System zu längeren oder kürzeren Transportwegen führt.

Für die Erreichbarkeit wird bewertet, ob sich mit den zu bewertenden Systemen alle Orte an der Anlage mit Wartungsbedarf erreichen lassen.

Die Ausfallrate beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass es bei einem Bauteil zu einem Ausfall kommt und ein Wartungseinsatz notwendig wird. Je geringer die Wahrscheinlichkeit, desto besser die Bewertung.

Unter dem Kriterium der Wetteranfälligkeit soll untersucht werden bei welchen Wetterverhältnissen sich die Wartung durchführen lässt und wie groß die Fläche der Systeme ist, auf die der Wind in Hauptwindrichtung seine Kraft auswirkt. Eine Durchführbarkeit der Wartung bei anspruchsvolleren Wetterverhältnissen erhöht den möglichen Zeitraum für Wartungen. Eine geringere Fläche sorgt für geringere Krafteinwirkungen auf die Anlagenstrukturen.

Das Kriterium der Verfügbarkeit gibt für die grobe Bewertung nicht die Verfügbarkeit der gesamten Anlage wieder, da dies ohne eine detaillierte Betrachtung zu komplex zu beurteilen ist. Sie steht für die Verfügbarkeit der Transportmittel zum Antransport oder der Systeme zum Zeitpunkt der Installation und deren Bauteile für Wartungszwecke.

Die Lebensdauer bewertet, wie lange die Systeme in der Anlage bestehen bleiben können, bis sie ersetzt werden müssen. Eine höhere Lebensdauer sorgt für geringere Investitionskosten in neue Systeme, geringere Ausfallzeiten und weniger Wartungseinsätze.

Aspekte der Verletzungsgefahr am Personal und deren Wohlbefinden, sowie dem Beschädigungsrisiko von Anlagenbauteilen, werden unter dem Kriterium der Sicherheit untersucht.

Mit dem Kriterium der Umsetzbarkeit wird betrachtet, inwiefern die Systeme mit heutiger Technik realisiert werden können, und wie etabliert Lösungen mit diesen Systemen sind. Für weniger erprobte Systeme liegen weniger Erfahrungswerte vor und das Fehlerpotential ist erhöht.

Für den Anlagenschwerpunkt soll bewertet werden, ob ein System den Schwerpunkt der Anlagen nach oben unter nach unten verschiebt. Ein erhöhter Schwerpunkt gefährdet die Stabilität der Schwimmplattform und muss vermutlich mit Anpassungen in dieser kompensiert werden.

Unter der Funktionsintegration soll betrachtet werden, wie viele Einzelsysteme in einer Variante mehrere Funktionen ausführen können. Durch die Erfüllung mehrere Funktionen durch ein einzelnes System wird der Wartungsablauf simpler. Zudem können die Systeme eingespart werden, die ansonsten die weiteren Funktionen bewältigen sollten. Hierdurch werden Kosten und Gewicht eingespart. Die Erledigung mehrerer Funktionen durch ein System kann aber auch zu einem langsameren Ablauf führen, falls Funktionen, die an sich zeitgleich ablaufen könnten, von dem Einzelsystem nacheinander abgearbeitet werden müssen. Zudem ist eine hohe Ausfallrate oder eine geringe Verfügbarkeit von Ersatzteilen, bei einem multifunktionalem System gegebenenfalls schwerwiegender zu bewerten, da es bei mehreren Funktionen zu einem Ausfall kommt.

Anschließend zum Erstellen der Bewertungskriterien werden diese gewichtet, um zu bestimmen, welches Kriterium wie viel Einfluss auf die Bewertung haben sollte. Die Gewichtung wird durch eine Gewichtungsmatrix durchgeführt, in der die Kriterien zeilen- und spaltenweise miteinander verglichen werden. Wie in dem Beispiel in Tabelle 4 dargestellt, wird überprüft, ob das Kriterium der Zeile wichtiger ist als das Kriterium der Spalte. Wenn dies zutrifft, wird eine Eins in das Feld der Matrix eingetragen. Falls das Kriterium der Spalte ausschlaggebender als das Kriterium der Zeile ist, wird eine Null in das Feld der Matrix eingetragen. In dem Beispiel ist Kriterium A für die Bewertung wichtiger als Kriterium B. Nachdem dieser Abgleich unter allen Kriterien abgeschlossen ist, wird die Summe der Einsen in einer Zeile zusammengefasst und in der Spalte Anzahl festgehalten. Daraufhin wird der Wert einer Zeile in der Spalte Anzahl als Bruchteil der Gesamtanzahl in der Spalte Anzahl betrachtet, um einen prozentualen Anteil für die Gewichtung zu bilden. Diese wird in der Spalte Gewichtung notiert und gibt an zu welchem prozentualen Anteil dieses Kriterium der entsprechenden Zeile in die Gesamtbewertung einfließen soll. Um den Einfluss eines persönlichen Bias zu vermeiden, sollte die Gewichtung von mehreren Personen durchgeführt werden und ein Mittelwert der Gewichtungsergebnisse gebildet werden.

Tabelle 4: Beispiel einer Gewichtungsmatrix

Bewertungskriterium	A	B	Anzahl	Gewichtung
A	x	1	1	100,00%
B	0	x	0	0,00%

Für diese Ausarbeitung wurden zwei Gewichtungen zu einem Endergebnis zusammengefasst. Die zugrundeliegenden Gewichtungsmatrizen befinden sich im Anhang unter Tabelle 17 bis Tabelle 18 und das gemittelte Ergebnis wird in Tabelle 5 veranschaulicht. Das Ergebnis zeigt die Sicherheit, die Erreichbarkeit und die Ausfallrate in absteigender Reihenfolge als die drei wichtigsten Kriterien. Die Sicherheit hat mit 15,38 % an der Gesamtbewertung die höchste Gewichtung. Die drei Kriterien mit der geringsten Gewichtung sind in absteigender Reihenfolge

das Gewicht, die Lebensdauer und die Funktionsintegration. Die Funktionsintegration bestimmt hierbei einen Anteil von 1,92 % an der Gesamtbewertung. Es ist jedoch zu vermerken, dass die Funktionsintegration, wie zuvor erwähnt, einen Einfluss auf anderen Bewertungskriterien ausüben kann. Die übrigen Kriterien besitzen eine Gewichtung im Bereich von 6,41 % bis 8,33 %.

Tabelle 5: Gewichtung der Bewertungskriterien

Bewertungskriterium	Gesamtgewichtung
Gewicht	5,13%
Kosten	8,33%
Geschwindigkeit	8,33%
Wartungswege	7,05%
Erreichbarkeit	11,54%
Ausfallrate	10,26%
Wetteranfälligkeit	6,41%
Verfügbarkeit	8,33%
Lebensdauer	4,49%
Sicherheit	15,38%
Umsetzbarkeit	6,41%
Anlagenschwerpunkt	6,41%
Funktionsintegration	1,92%

Eine Vorauswahl an Varianten aus dem morphologischen Kasten wird anhand des Stands der Technik getroffen. Hieraus ergeben sich die folgenden grundlegenden Varianten. Der Antransport wird entweder komplett von SOVs absolviert oder es wird ein CTV für den Kleinteiltransport und den Personaltransport genutzt, während ein SOV die Großteile transportiert. Über ein Gangway wird das Personal von den Schiffe zu der MRWEA-Plattform transportiert und die Großteile werden mit einem Kran übergeben. Die Kleinteile werden für die Übergabe entweder von dem Kran bewegt oder von dem Personal über die Gangway getragen. Es liegt keine Lagerung von Teilen an der Anlage vor. Für die Inspektion und Wartungen an den Rotorblättern wird das Personal mit Gurtzeug abgeseilt. Horizontal werden die Kleinteile von dem Personal getragen und der vertikale Transport wird durch einen Kran mit einer Seilwinde durchgeführt. Der Großteiltransport wird von einem zentralen Kransystem bewältigt, welches stationär platziert ist oder verfahren werden kann. Das Personal verfährt vertikal mit Aufzügen und bewegt sich horizontal auf Laufstegen. Der Ausfallsichere Personaltransport wird über Laufstege und Leitern gesichert. Ein Ausschnitt der auf diese Weise gebildeten Varianten wird in Tabelle 6 veranschaulicht.

Von diesen am Stand der Technik gebildeten Varianten werden weitere Abwandlungen gebildet. Zum einen werden Varianten aufgestellt bei denen die anderen vorhandenen Großteiltransporte genutzt werden. Des Weiteren werden einige Varianten mit einer Teillagerung modifiziert und einige werden für den Massentransport von Bauteilen mit

Lagerung der Teile an der Anlage ausgelegt, um möglichst wenige Antransportfahrten durchführen zu müssen.

Tabelle 6: Ausschnitt der Varianten für die Vorauswahl

Variante	1	2	3	4
Antransport Kleinteile	SOV	CTV	SOV	CTV
Antransport Großteile	SOV	SOV	SOV	SOV
Antransport Personal	SOV	CTV	SOV	CTV
Übergabe Kleinteile	Kran	Kran	Kran	Kran
Übergabe Großteile	Kran	Kran	Kran	Kran
Übergabe Personal	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway
Bauteillagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung
Inspektion	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug
Kleinteiltransport (Vertikal)	Kran	Kran	Kran	Kran
Kleinteiltransport (Horizontal)	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal
Großteiltransport	Zentraler Kran stationär	Zentraler Kran stationär	Zentraler Kran verfahrbar	Zentraler Kran verfahrbar
Personaltransport (Vertikal)	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Außerhalb des Stands der Technik werden Varianten mit dem Fokus auf Geschwindigkeit oder Kosten aufgestellt, da diese als Optimierungsziel festgehalten wurden. Zudem sind Varianten mit möglichst hohem Anteil an modernen wenig etablierten Systemen aufzustellen, um zukunftsgerichtete Varianten zu untersuchen.

Mit den beschriebenen Variantenbildungen sind 40 Varianten erstellt worden. Zudem werden 30 zufällig generierte Varianten betrachtet, da diese mögliche übersehene Systemkombinationen aufweisen könnten und den Einfluss des vorherig eingegangenen Bias

verringern. Somit wird eine Gesamtanzahl von insgesamt 70 Varianten für die Bewertung und die Auswahl von detailliert zu untersuchenden Varianten verwendet, welche in ihrer Gesamtheit im Anhang in Tabelle 19 bis Tabelle 27 dargestellt werden.

Die Bewertung der Varianten wird durch eine vergleichende Bewertung der Einzelsysteme in ihren Unterfunktionen des morphologischen Kastens durchgeführt, welche anschließen zu einer Gesamtbewertung einer Variante zusammengesetzt wird. Dies standardisiert die Ergebnisse und verringert den Bias zu einer Einzelbewertung jeder Variante. Zudem stellt es eine Verringerung des Zeitaufwandes dar. Die aus den Bewertungen der Einzelsysteme gebildeten Variantenbewertungen werden anschließend auf Synergien zwischen den Einzelsystemen untersucht, da diese bisher nicht in der Bewertung beachtet werden, und die Bewertung wird entsprechend angepasst. Weiterhin kann die Funktionsintegration und ihr Einfluss auf andere Bewertungskriterien nicht anhand der Einzelsysteme erfasst werden und muss auch zusätzlich in der Bewertung ergänzt werden.

Einzelsysteme in den Unterfunktionen werden vergleichend bewertet, damit der Bewertungsprozess vereinfacht wird und zu diesem Zeitpunkt keine detaillierte Analyse aller Einzelsysteme und Varianten durchgeführt werden muss. Die vergleichende Bewertung betrachtet die Einzelsysteme einer Unterfunktion und vergleicht diese innerhalb der Bewertungskriterien. Ist ein Einzelsystem in einem Kriterium besser aufgestellt als die anderen möglichen Lösungen, wird es positiv bewertet. Falls das Einzelsystem schlechter im Vergleich begutachtet wird, wird es negativ markiert. Sollte es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Einzelsystemen geben, das bewertete System zwischen den anderen Lösungen zu bewerten sein oder das System keinen Einfluss auf das Bewertungskriterium darstellen, wird es neutral mit einem x notiert. Hierbei wird der horizontale Ersatzpersonaltransport nicht bewertet, da nur eine Möglichkeit aufgestellt wurde, die für jede Variante gleich gilt.

Die Bewertung der Antransportmöglichkeiten der Kleinteile wird beispielhaft in Tabelle 7 gezeigt. Das Gewicht des Antransports wirkt keinen Einfluss auf die Schwimmplattform aus, weswegen es nicht bewertet wird. Die Kosten sind wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben bei den CTVs am geringsten und bei den Lastschiffen am höchsten. Die anderen beiden Möglichkeiten liegen zwischen dieser Kostenspanne. Bei der Geschwindigkeit bewegen sich die CTVs und Helikopter schneller als die SOVs und Lastschiffe. Für die Wartungswege sind die Antransporte an ähnliche Routen gebunden, weswegen kein unterschied für die Bewertung aufgestellt wird. Ortsbedingt könnte der Helikopter per Luftlinie eine kürzere Strecke als die Schiffe aufweisen, aber wegen der Situationsbedingtheit wird dies nicht als signifikant genug für eine Differenz in der Bewertung eingeschätzt. Lastschiffe und SOVs verfügen über eine höhere Reichweite, um weiter entfernte Anlagen zu erreichen. Im Zusammenhang mit dem

Szenario von 200 m Wassertiefe am Anlagenstandort und einem entsprechenden Küstenabstand werden sie besser als CTV und Helikopter in der Erreichbarkeit eingestuft. Da die Antransporte generell über einen Charterservice bestellt werden, stellt die Ausfallrate dieser keine Relevanz für die Anlagenseite des Projektes dar. Wie vorherig in Kapitel 2.3.2 erläutert, weisen CTVs die höchste Wetteranfälligkeit auf gefolgt von den Helikoptern. Bei der Bestellung eines Antransportes bei einem Charterservice haben Lastschiffe, den längsten Zeitraum bis sie zur Verfügung stehen, während CTVs und Helikopter den geringsten Zeitraum aufweisen. Deshalb wird die Verfügbarkeit dementsprechend bewertet. Die Lebensdauer und die Sicherheit der Antransporte liegen, wie die Ausfallrate, in der Verantwortung des Charterservices und werden nicht bewertet. Bei der Sicherheit besteht zudem kein signifikant erhöhtes Sicherheitsrisiko eine Möglichkeit gegenüber den andern, sodass die Bewertung ausgesetzt werden kann. Mit dem Anlagenschwerpunkt verhalten sich die Antransporte wie beim Gewicht und es wird kein Einfluss auf die Schwimmplattform ausgeübt.

Tabelle 7: Einzelbewertung Antransport Kleinteile

Ausführung / Bewertungskriterium	CTV	SOV	Lastschiff	Helikopter
Gewicht	x	x	x	x
Kosten	+	x	-	x
Geschwindigkeit	+	-	-	+
Wartungswege	x	x	x	x
Erreichbarkeit	-	+	+	-
Ausfallrate	x	x	x	x
Wetteranfälligkeit	-	+	+	x
Verfügbarkeit	+	x	-	+
Lebensdauer	x	x	x	x
Sicherheit	x	x	x	x
Umsetzbarkeit	x	x	x	x
Anlagenschwerpunkt	x	x	x	x

Die restlichen Einzelbewertung der Prozesslösungen liegen im Anhang unter Tabelle 28 bis Tabelle 41 vor. Hierbei ist zu beachten, dass die Ausfallrate der Gangway basierten Übergabelösungen wie zuvor als im Verantwortung des Charterservices angesehen wird. Deshalb sind sie eher positiv gegenüber den anderen Lösungen bewertet. Zudem sind Möglichkeiten, die den physikalischen Einsatz des Personals erfordern, gegenüber der Lösungen ohne diesen Einsatz, geringer in der Sicherheit bewertet. Der Grund hierfür ist die erhöhte Wahrscheinlichkeit einer Verletzung des Personals oder langfristiger gesundheitlicher Schäden dieser, wie beim Tragen schwerer Lasten.

Tabelle 8: Anzahl der Bewertungen innerhalb der Prozesse

Bewertungskriterium	Anzahl der Bewertungen
Gewicht	12
Kosten	15
Geschwindigkeit	12
Wartungswege	9
Erreichbarkeit	7
Ausfallrate	10
Wetteranfälligkeit	14
Verfügbarkeit	15
Lebensdauer	11
Sicherheit	10
Umsetzbarkeit	7
Anlagenschwerpunkt	7

Daraufhin werden die Bewertungen der Systemlösungen auf eine Skala von Null bis Zehn skaliert und über die Gesamtanzahl an gewerteten Bewertungen innerhalb eines Bewertungskriteriums gewichtet. Die Skala gibt bei Null die schlechteste Bewertung wieder und bei Zehn die höchste Bewertung. Für die Umskalierung werden die negativ bewerteten Kriterien mit Null Punkten versehen und die positiv bewerteten Kriterien mit Zehn Punkten dotiert. Sind alle Systemlösungen eines Prozesses in einem Kriterium als neutral bewertet, also wenn sie alle als gleich geeignet oder als irrelevant gelten, werden sich nicht weiter gewertet und erhalten keine Punktzahl für die Umskalierung. Liegt eine neutrale Bewertung als Zwischenmaß zwischen einer positiven und einer negativen Bewertung vor erhält sie Fünf Punkte. Nun wird über alle Prozesse betrachtet für welche Kriterien eines Prozesses jeweils gewertete Lösungen vorliegen und diese Anzahl wird pro Kriterium zusammengezählt. Mit der Gesamtanzahl wie oft pro Kriterium gewertete Lösungen vorliegen, kann bestimmt werden, wie groß der Gesamteinfluss jeder Bewertung in diesem Kriterium ist. Tabelle 8 gibt die Zählung wieder und man kann ablesen, welches der Kriterien am häufigsten bewertet wird und welches am seltensten. Die Erreichbarkeit, die Umsetzbarkeit und der Anlagenschwerpunkt sind mit sieben Bewertungen am seltensten in den Prozessen bewertet. Am häufigsten sind die Kosten und die Verfügbarkeit mit 15 Zählungen bewertet. Somit hat beispielsweise eine Bewertung, die für Erreichbarkeit getroffen wird, einen höheren Einfluss als eine Bewertung der Kosten, da sie ein Siebtel der gesamten Bewertungen darstellt und es bei den Kosten ein Fünfzehntel aller Bewertungen ist. Somit kann der Einfluss der einzelnen Bewertungen auf die gesamte Bewertung in dem Kriterium einbezogen werden, indem die vergebenen Punkte von Null, Fünf oder Zehn innerhalb eines Bewertungskriteriums durch diese Anzahl der vorhandenen Bewertungen dividiert wird. Anschließend werden die vergebenen Punkte mit der Gewichtung des jeweiligen Kriteriums aus Tabelle 5 verrechnet. Nun kann die aus den oben beschriebenen Rechenschritten entstammende gewichtete Bewertung der Kriterien für

die Systemlösungen für jede dieser Möglichkeiten aufaddiert werden. Somit ergibt sich die gewichtete Bewertung der einzelnen Systemlösungen.

Tabelle 9: Gewichtete Einzelbewertung Antransport Kleinteile

Ausführung / Bewertungskriterium	CTV	SOV	Lastschiff	Helikopter
Gewicht	x	x	x	x
Kosten	0,0556	0,0278	0,0000	0,0278
Geschwindigkeit	0,0694	0,0000	0,0000	0,0694
Wartungswege	x	x	x	x
Erreichbarkeit	0,0000	0,1648	0,1648	0,0000
Ausfallrate	x	x	x	x
Wetteranfälligkeit	0,0000	0,0458	0,0458	0,0229
Verfügbarkeit	0,0556	0,0278	0,0000	0,0556
Lebensdauer	x	x	x	x
Sicherheit	x	x	x	x
Umsetzbarkeit	x	x	x	x
Anlagenschwerpunkt	x	x	x	x
Bewertung:	0,1806	0,2662	0,2106	0,1757

Tabelle 9 gibt das Beispiel der gewichteten Bewertung des Antransportes der Kleinteile wieder. Betrachtet man die Kosten des CTVs in der Tabelle 7, ist sie positiv bewertet. Somit erhält sie Zehn Punkte. Die Zehn Punkte werden durch die Anzahl der Bewertung in dem Kriterium Kosten aus Tabelle 8, dementsprechend 15, dividiert. Zudem wird der entstandene Quotient mit der Gewichtung der Kosten von 8,33 % aus Tabelle 5 multipliziert. Das Produkt ist der Wert von 0,0556 Punkten, der in Tabelle 9 dargestellt wird. Über alle Kriterien betrachtet erhält der CTV für den Antransport der Kleinteile somit 0,1806 Punkte. Kombiniert man jene Bewertung mit 14 der Lösungsbewertungen aus jeweils einem der anderen Prozessen, erhält man eine Bewertung der Variante zwischen Null und Zehn Punkten.

Die Bewertung der einzelnen Systemlösungen bietet die Möglichkeit die einzelnen Lösungen eines Prozesses untereinander zu vergleichen. Dies gibt eine Übersicht, welche Lösung nach der Bewertung als geeigneter für die Verwendung angesehen wird, welche in Tabelle 10 betrachtet werden kann. Hier ist zu sehen, dass die Prozess, in denen viele Kriterien unbewertet sind, geringen Einfluss auf die Gesamtbewertung haben, als Prozesse, in denen alle Kriterien berücksichtigt werden. Somit ist beim Antransport die höchste Einzelbewertung 0,2662 Punkte, während die höchste Einzelbewertung des horizontalen Kleinteiltransports 0,8307 Punkte erhält. Zudem wird gezeigt welche Ausführungen in ihrem Prozess die besten Bewertungen erhalten. Somit ist nach Tabelle 10 das SOV die beste Art des Antransportes. Aus dieser Betrachtung wird die 71 Variante für die Bewertung gebildet, welche aus den jeweils am besten bewerteten Einzellösungen der Prozesse besteht und somit vermutlich die beste Variantenbewertung erzielen wird. Zudem wird eine 72 Variante gebildet, welche die 71

Varianten mit gleich hoch bewerteten Einzellösungen ersetzt und versucht eine höhere Systemintegration zu erzielen. Diese zusätzlich ergänzten Varianten sind in Tabelle 12 aufgezeigt.

Tabelle 10: Übersicht der gewichteten Einzelbewertungen

Prozess	Ausführung	Bewertung
Antransport Kleinteile:	CTV	0,1806
	SOV	0,2662
	Lastschiff	0,2106
	Helikopter	0,1757
Antransport Großteile:	CTV	0,1806
	SOV	0,2662
	Lastschiff	0,2106
Antransport Personal:	CTV	0,1806
	SOV	0,2384
	Helikopter	0,1479
Übergabe Kleinteile	Gangway Personal	0,4693
	Gangway Hubwagen	0,5532
	Gangway Rollwagen	0,5532
	Gangway Förderband	0,3243
	Kran	0,4366
	Drohnen	0,2521
	Aufzug	0,3
Übergabe Großteile	Gangway Hubwagen	0,3888
	Gangway Förderband	0,1987
	Kran	0,3672
Übergabe Personal	Leiter	0,2972
	Aufzug	0,0983
	Gangway	0,5385
	Kran Gurtzeug	0,0791
	Kran Gondel	0,3179
Bauteillagerung	Lagerung Kleinteile	0,1848
	Lagerung Großteile	0,2255
	Lagerung aller Teile	0,2255
	Keine Lagerung	0,1849
Inspektion	Personal Gurtzeug	0,2267
	Personal Wartungslift	0,2496
	Installierte Kameras	0,4457
	Drohnen	0,3722
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Gurtzeug	0,5059
	Personal Wartungslift	0,5288
	Drohnen	0,537
	Wartungsroboter	0,1996

Prozess	Ausführung	Bewertung
Kleinteiltransport (Vertikal)	Aufzug	0,5293
	Kran	0,428
	Greifarm verfahrbar	0,4416
	Drohnen	0,3612
	Liftplattform	0,332
Kleinteiltransport (Horizontal)	Laufsteg Personal	0,6844
	Laufsteg Förderband	0,4551
	Laufsteg Rollwagen	0,7816
	Laufsteg Hubwagen	0,7816
	Schienenwagen	0,7337
	Schienenführung hängend	0,8307
	Kran verfahrbar	0,8307
	Greifarm stationär	0,3105
	Greifarm verfahrbar	0,7313
	Plattform verfahrbar	0,517
Drohnen	0,6979	
Großteiltransport	Zentraler Kran stationär	0,6569
	Zentraler Kran verfahrbar	0,693
	Dezentrale Kräne spaltweise	0,4584
	Dezentrale Kräne reihenweise	0,5825
	Dezentrale Kräne flächenweise	0,4176
	Liftplattform Greifarm	0,4408
	Greifarm schienengeführt	0,5579
Personaltransport (Vertikal)	Leiter	0,343
	Aufzug	0,4457
	Treppe	0,2545
	Liftplattform	0,3932
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg	0,8005
	Laufsteg Förderband	0,3126
	Laufsteg Rollwagen	0,793
	Schienenwagen	0,7427
	Plattform verfahrbar	0,517
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Leiter	0,314
	Treppe	0

Zur Berechnung der gesamten Variantenbewertung werden die gewichteten Bewertungen der einzelnen Systemlösungen für die in den Varianten beschriebene Zusammensetzung der Prozesslösungen kombiniert. Eine Addition dieser Bewertungen ergibt die vorläufige Variantenbewertung ohne Betrachtung der Systemintegration. Diese wird für jede Variante, mit Untersuchung der vorliegenden Integration im Verhältnis zu den höchstmöglichen Anzahl an integrierten Prozessen, bewertet. Zudem wird ein Einfluss der Systemintegration auf die anderen Kriterien betrachtet. Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf Synergieeffekten, die das Gewicht oder die Kosten der Gesamtanlage verringern oder die Verlangsamung des Systems

durch nicht zeitgleich ablaufende Prozesse. Diese Bewertung wird, mit der in Tabelle 5 angegebenen Gewichtung verrechnet, und zu der vorläufigen Variantenbewertung addiert, um die gesamte Variantenbewertung zu bilden.

Tabelle 11: Auszug der Gesamtbewertung

Platzierung	1	2	3	4	5	6
Prozess \ Variante	71	72	37	32	21	25
Antransport Kleinteile	0,2662	0,1806	0,2662	0,2662	0,2662	0,1757
Antransport Großteile	0,2662	0,2662	0,2662	0,2662	0,2662	0,2106
Antransport Personal	0,2384	0,1806	0,2384	0,2384	0,2384	0,1479
Übergabe Kleinteile	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,4366	0,5532
Übergabe Großteile	0,3888	0,3888	0,3888	0,3672	0,3672	0,3888
Übergabe Personal	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385
Bauteillagerung	0,2255	0,2255	0,2255	0,1849	0,2255	0,2255
Inspektion	0,4457	0,4457	0,2496	0,4457	0,2267	0,3722
Wartung/ Geringfügige Reparatur	0,537	0,5288	0,5288	0,537	0,5059	0,5059
Kleinteiltransport (Vertikal)	0,5293	0,5293	0,4416	0,332	0,428	0,332
Kleinteiltransport (Horizontal)	0,8307	0,7816	0,7313	0,7816	0,6844	0,7816
Großteiltransport	0,693	0,693	0,5579	0,4408	0,693	0,693
Personaltransport (Vertikal)	0,4457	0,4457	0,4457	0,3932	0,4457	0,3932
Personaltransport (Horizontal)	0,8005	0,793	0,8005	0,793	0,8005	0,8005
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314
Systemintegration	6,5	7,5	8,5	6	6,5	6,5
Bewertung	7,198	7,009	6,71	6,567	6,562	6,558

Tabelle 11 zeigt die Bewertungen der Sechs am höchsten bewerteten Varianten auf. In der Tabelle ist die Zusammensetzung der Ergebnisse zu erkennen. Die Gesamtheit der Bewertungen ist im Anhang in Tabelle 43 bis Tabelle 51 angegeben. Die Ergebnisse dieser Bewertung liegen in einem Bereich von mindestens 4,463 bis höchstens 7,198. Die Bewertung der Varianten sind insgesamt im mittleren Bereich der Skala, da die Systemlösungen jeweils ihr Vor- und Nachteile aufweisen. Keine der Lösungen besitzt im Vergleich zu den anderen nur negative oder positive Aspekte, sonst kämen sie nicht für eine möglichen Betrachtung in Frage. Hierdurch kann keine rein positive Bewertung von Zehn oder eine ausschließlich negative Bewertung von Null entstehen. Ausnahme hierzu ist die Bewertung der Treppe und der Leiter im Vergleich bei dem vertikalen Ersatzpersonaltransport. Auffällig ist zudem, dass die zufällig erstellten Varianten schlechter abschneiden als die bedacht erstellten Varianten, wie es zu erwarten ist. Die beste Bewertung der Zufallsvarianten liegt mit Variante 66 und einer Bewertung von 6,199 Punkten auf Platz 30 der Bewertungen.

Zu diesem Zeitpunkt der Bewertung wird untersucht, ob sich alle 3,726 Milliarden möglichen Varianten numerisch in MATLAB aufstellen und bewerten lassen, um die tatsächlich besten Varianten zu bestimmen [69]. Die Standardisierung bei den Einzelbewertung ermöglicht eine Kombination der Bewertungen und eine anschließende Addition dieser Kombination ergibt das

vorläufige Bewertungsergebnis. Dies lässt sich in MATLAB berechnen. Die Bewertung der Systemintegration soll nach der Bewertung in MATLAB für die besten 50 Varianten händisch ergänzt werden, damit die Gesamtbewertung erzielt wird. Jedoch benötigt die Erstellung der Kombinationsliste in MATLAB bereits eine Größe des Arbeitsspeichers die konventionell nicht zur Verfügung steht. Zudem sind die Umstellung und Auflistung der erhaltenden Datenmengen als problematisch umsetzbar einzustufen. Aus Gründen des hohen Aufwands der Ergebnisaufstellung wird die numerische Betrachtung des Problems nicht weiter betrachtet und es wird mit dem ursprünglichen Verfahren der Vorbegrenzung der Varianten fortgefahren.

Tabelle 12: Ergebnisvarianten der Variantenbewertung

Platzierung	1	2	3	4	5	6
Variante	71	72	37	32	21	25
Antransport Kleinteile	SOV	CTV	SOV	SOV	SOV	Helikopter
Antransport Großteile	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	Lastschiff
Antransport Personal	SOV	CTV	SOV	SOV	SOV	Helikopter
Übergabe Kleinteile	Gangway Hubwagen	Gangway Rollwagen	Gangway Hubwagen	Gangway Rollwagen	Kran	Gangway Hubwagen
Übergabe Großteile	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen	Kran	Kran	Gangway Hubwagen
Übergabe Personal	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway
Bauteillagerung	Lagerung Großteile	Lagerung aller Teile	Lagerung aller Teile	Keine Lagerung	Lagerung Großteile	Lagerung Großteile
Inspektion	Installierte Kameras	Installierte Kameras	Personal Wartungs-lift	Installierte Kameras	Personal Gurtzeug	Drohnen
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Drohnen	Personal Wartungs-lift	Personal Wartungs-lift	Drohnen	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug
Kleinteiltransport (Vertikal)	Aufzug	Aufzug	Greifarm verfahrbar	Lift-plattform	Kran	Lift-plattform
Kleinteiltransport (Horizontal)	Schiene-nführung hängend	Laufsteg Rollwagen	Greifarm verfahrbar	Laufsteg Rollwagen	Laufsteg Personal	Laufsteg Hubwagen
Großteiltransport	Zentraler Kran verfahrbar	Zentraler Kran verfahrbar	Greifarm schienen-geführt	Lift-plattform Greifarm	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran verfahrbar
Personaltransport (Vertikal)	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Lift-plattform	Aufzug	Lift-plattform
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg Rollwagen	Laufsteg	Laufsteg Rollwagen	Laufsteg	Laufsteg
Ersatzpersonal-transport (Vertikal)	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter
Ersatzpersonal-transport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg
Bewertung	7,198	7,009	6,71	6,567	6,562	6,558

In Tabelle 12 werden die Sechs am besten bewerteten Varianten aus der vergleichenden Bewertung in Tabelle 11 mit ihrer Kombination an Systemlösungen angegeben. Diese Varianten werden für die weitere Systemanalyse verwendet. Sie besitzen die höchsten Bewertungen und geben eine Variation von Untersystemen wieder, weshalb sie für die weitere Betrachtung geeignet sind.

3.5 Visualisierung der Konzepte

Die Visualisierung der Konzeptvarianten dient zur Veranschaulichung der Prozessabläufe. Sie soll eine repräsentative Planung der Lösungssystem einer Variante im korrekten Maßstab wiedergeben und für Präsentation der untersuchten Varianten genutzt werden können. Die in diesem Kapitel erarbeiteten Maßstäbe der Anlage werden in anschließenden Kapiteln für die Betrachtung der zurückgelegten Wege und deren Zeiten an der Anlage verwendet. Zudem stellen die erarbeiteten Modelle die Grundlage der Gewichts- und Kräftebetrachtung der Anlage dar.

Es werden die horizontale sowie die vertikale Tragestrukturausrichtung untersucht. Zum Erzielen der zu erreichenden Nennleistung von 45 MW mit Einzelrotoren von 1 MW Nennleistung, werden 45 dieser Rotoren benötigt. In der horizontalen Ausrichtung werden drei Zeilenpaare von sieben und acht Rotoren übereinander angeordnet. Zwischen den Rotoren der Siebenerzeilen und denen der Achterzeilen besteht ein Versatz, um die möglichst dichteste Anordnung der Rotoren in einem hexagonalen Muster zu erzielen. Für die vertikale Ausrichtung werden neun Rotorenspalten mit je fünf Rotoren aufgestellt. Diese verfügen über einen vertikalen Versatz, um genannte dichteste Packung zu erzielen. Hieraus entstehen die beiden Anordnungen, welche in Abbildung 17 gezeigt werden.

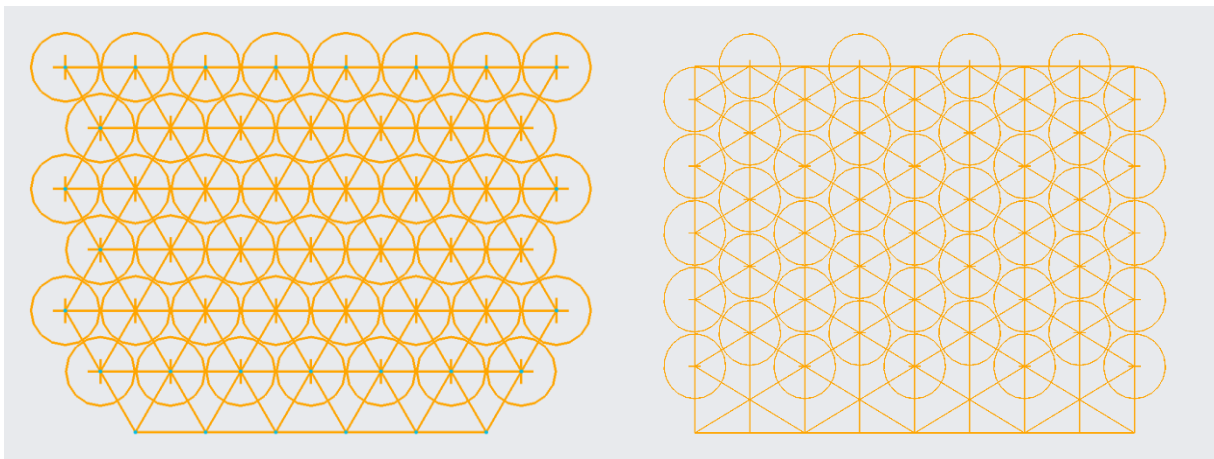


Abbildung 17: Geplante Tragestrukturanordnungen horizontal (links) und vertikal (rechts)

Der Abstand zwischen zwei Rotoren muss mindestens dem Rotordurchmesser zusätzlich zu einem Sicherheitsabstand von 3 % des Rotordurchmessers entsprechen [24]. Mit dem Rotordurchmesser aus Kapitel 3.1 von 57,15 m ergibt sich somit ein Abstand von 58,87 m zwischen den Rotoren. Die Rotoren müssen weiterhin einen Mindestabstand von 22 m zu der

Wasseroberfläche aufweisen. Um dies zu erreichen, wird in beiden Anordnungen jeweils eine weitere Tragestrukturzeile in der hexagonalen Anordnung unterhalb der untersten Rotorenzeile eingefügt. Diese zusätzlichen Tragestrukturzeilen werden bereits in Abbildung 17 dargestellt. Hieraus ergibt sich bei der horizontalen Anordnung eine Gesamthöhe der Tragestruktur von 305,87 m und eine Gesamtbreite von 412,05 m. Die vertikale angeordnete Tragestruktur verfügt über eine Gesamthöhe von 323,75 m und eine Gesamtbreite von 407,83 m.

Die optimale Tiefe der Tragestruktur wird als 10 % der Tragestrukturbreite ermittelt [25]. Hieraus ergibt sich für die horizontale Anordnung eine Tiefe von 41,21 m und für die vertikale Anordnung eine Tiefe von 40,78 m.

Die Strukturelemente der Tragestruktur werden als Stäbe ausgeführt. Diese werden im hexagonalen Muster wie die Rotoren platziert, um diese zu verbinden. Zudem wird in vertikale Richtung eine Querverstrebung in Richtung des Kraftflusses von vorderer zu hinterer Strukturebene erstellt, um die Kraft besser von den Rotoren in die Struktur und dann in die Schwimmplattform leiten zu können. In horizontale Richtung werden Querstreben in beide Richtungen gespannt, um die Belastung der Struktur durch Torsion besser aufnehmen zu können. Zudem wird eine zusätzliche Anordnung ohne diese Querstreben erstellt, da in der vereinfachten Betrachtung keine Torsionskräfte in die Struktur eingehen und die mögliche Gewichtsersparnis ohne Querstreben untersucht werden soll.

Die Länge der meisten Stäbe entspricht entweder dem Abstand zwischen den Rotoren von 58,87 m oder der Tiefe der Tragestruktur der jeweiligen Anordnung. Die Länge der Querverstrebungen lässt sich trigonometrisch aus der Länge der anderen Stäbe und den nach der Anordnung festen Winkeln zwischen diesen berechnen.

Um die Dicke der verwendeten Stäbe zu bestimmen, wird in einer vereinfachten Betrachtung des Systems, die wirkenden Stabkräfte benötigt. Hierfür wird eine, wie oben beschriebene, Anordnung von Stäben in Femap in drei verschiedenen Modellen erstellt [70]. Nun wird an den Einwirkungspunkten der einzelnen Rotoren die durch die Rotoren wirkende Kraft auf die Struktur angewendet. Die wirkende Kraft pro Rotor ergibt sich aus dessen Gewichtskraft und der bei Nenngeschwindigkeit auf den Rotor wirkende Windkraft.

In Kapitel 3.1 wird die Masse der Rotoren und Gondel angegeben. Zusammengefasst als Masse der Rotor-Gondel-Baugruppe m_{RG} von 53.199 kg und verrechnet mit der Erdbeschleunigung g von $9,81 \frac{m}{s^2}$ und einem Sicherheitsfaktor $\gamma_{f,Gravity}$ von 1,174 nach Formel 12, ergibt sich eine Massekraft $F_{Gewicht}$ von 612,6 kN pro Rotor-Gondelgruppe [24].

$$F_{Gewicht} = m_{RG} g \gamma_{f,Gravity} \quad (12)$$

Die durch den Wind wirkende Schubkraft pro Rotor ergibt sich aus Formel 13 und wird mit dem Sicherheitsfaktor $\gamma_{f,Thrust}$ von 1,5 versehen [24]. Mit der Luftdichte ρ von $1,225 \frac{kg}{m^3}$, der Nennwindgeschwindigkeit des Betriebspunktes v_{rated} von $11 \frac{m}{s}$, dem Schubbeiwert c_t von

0,827 und dem Rotordurchmesser aus Kapitel 3.1, ergibt sich eine Schubkraft F_t von 235,8 kN pro Rotor [58].

$$F_t = \frac{\rho c_t \pi}{8} d^2 v_{rated}^2 \gamma_{f,Thrust} \quad (13)$$

Die Gewichtskraft wirkt Senkrecht Richtung Erdboden und die Windkraft wird als orthogonal auf die Rotorstrukturebene wirkend angenommen. Bei der Gewichtskraft wird ein geringerer Sicherheitsfaktor angewendet als bei der Schubkraft, da bei der Masse der Bauteile bereits ein Sicherheitsfaktor verrechnet wird. Zudem wird bei der Schubkraft unter Berücksichtigung der Vereinfachungen im System ein erhöhter Sicherheitsfaktor genutzt. Mitunter einer dieser Faktoren ist, dass die Kraft des Windes auf die Strukturelemente aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt wird. Abbildung 18 zeigt beispielhaft die Simulation der Stabkräfte in Femap anhand der vertikalen Anordnung ohne horizontale Querstreben. Die Verbindungspunkte zur Schwimmplattform werden für die Simulation als Fixpunkte angenommen.

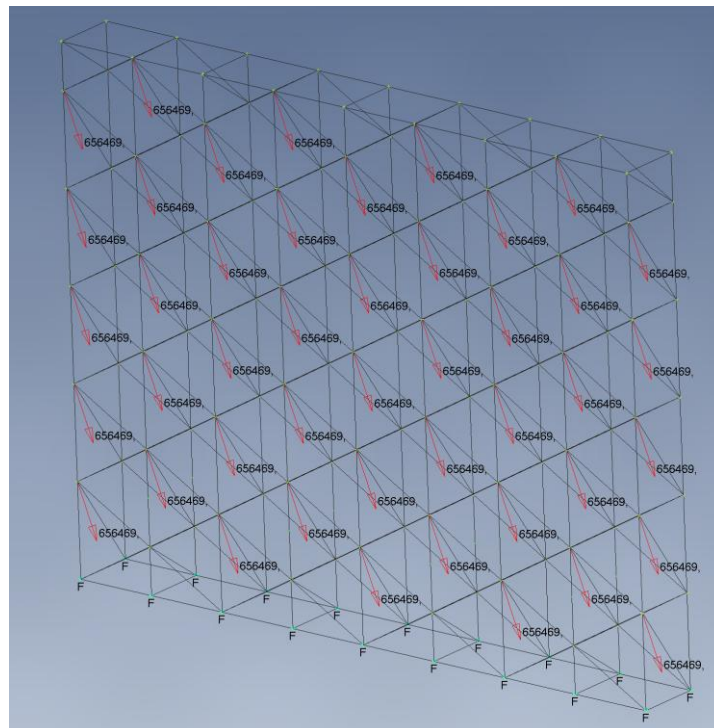


Abbildung 18: Simulation der Stabkräfte in Femap [70]

Als Material der Strukturelemente ist ein Stahl mit Streckgrenze σ_{yield} von 355 MPa und einem Elastizitätsmodul E von 202 GPa angenommen. Aus der Simulation dieser Umstände in Femap ergeben sich die jeweiligen Stabkräfte $F_{Stab,i}$. Diese können nach Formel 14 zu der erforderlichen Dicke der einzelnen Stäbe $D_{Stab,i}$ umgerechnet werden [25]. Das Verhältnis von dem Durchmesser der Stäbe zu ihrer Wanddicke $r_{t,b}$ beträgt $\frac{1}{120}$ und γ_m beträgt 1,5.

$$D_{Stab,i} = \sqrt{\frac{|F_{Stab,i}| \gamma_m}{\sigma_{yield} \pi r_{t,b}}} \quad (14)$$

Bei Druckkräften wird zusätzlich untersucht, ob die Stäbe nach Formel 15 ihre kritische Knickkraft $F_{Buckling}$ überschreiten. Hierbei entspricht I dem axialen Flächenträgheitsmoment des Querschnitts und $l_{Stab,i}$ der Länge des untersuchten Stabs.

$$F_{Buckling} = \frac{\pi^2 EI}{l_{Stab,i}^2} \quad (15)$$

Wird die kritische Knickkraft in einem Stab überschritten, würde es zu einem Knicken betroffener Stäbe kommen und eine Berechnung der knickstabilen Stabdicke $D_{Stab,Buckling,i}$ nach Formel 16 mit $\gamma_{m,Buckling} = 1,2$ ist nötig.

$$D_{Stab,Buckling,i} = \sqrt[4]{\frac{8 |F_{Stab,i}| \gamma_{m,Buckling} l_{Stab,i}^2}{\pi^3 E r_{t,b}}} \quad (16)$$

Die auf diese Weise ermittelten Stabdicken sind für jede Ausrichtung an Stäben auf den verschiedenen Ebenen der Tragestruktur gemittelt im Anhang in Tabelle 52 und Tabelle 53 angegeben. Die Ebenen steigen mit höherer Nummerierung in der Höhe bei der Tragestruktur an. Es werden die gemittelten Werte verwendet, um Wertausreißer bei den Maximalwerten aufgrund der starken Vereinfachung des Systems zu vermeiden. In den meisten Fällen weichen die gemittelten Werte nur gering von den Maximalwerten ab, mit einigen Ausnahmen bei denen der Maximalwert doppelt so hohe Werte wie das Mittel erreicht. Zudem sind einheitlich Große Stäbe leichter für die Beschaffung und den Aufbau der Bauteile. Weiterhin ist zu beachten, dass Stäbe die horizontal zwischen den Fixpunkten auf Ebene Null liegen, keine Krafteinwirkung in der Simulation erfahren. Sie werden für die spätere Visualisierung als 1 m im Durchmesser angenommen. Die Ebenen Zehn und Elf bei der vertikalen Anordnung ohne horizontale Querstreben weisen viele Stäbe mit sehr geringen bis nicht vorhandenen Durchmesser auf, da nur geringe Belastungen auf sie wirken. Diese Stäbe könnten aus dem Modell entfernt werden, aber sind notwendig falls ein Transportmechanismus, wie zum Beispiel ein Kran auf der obersten Ebene angebracht werden soll. Für diesen Fall muss das Gewicht dieser mit in Betracht gezogen werden, um die Stabdicke erneut zu bestimmen. In Kapitel 4.2 wird auf die Krafteinwirkung der Transportmechanismen auf die Struktur eingegangen. Für die Visualisierung wird jedoch ein generelles Modell erstellt und aus Vereinfachungsgründen noch kein Transportmechanismus in die Berechnung einbezogen. Die bisher errechneten mittleren Stabdicken werden zum Erstellen der Modelle in Blender genutzt. In Blender werden die Tragestruktur und die Rotoren wie oben und in Kapitel 3.1 beschrieben modelliert. Zum Zwecke der Sichtbarkeit werden Stäbe mit dem geringsten Durchmesser von 0,4 m dargestellt. Alle Stäbe, die unterhalb dieses Grenzwert liegen, werden in der Visualisierung als Stäbe mit 0,4 m Durchmesser dargestellt, da sie ansonsten nicht wahrnehmbar wären. Der Grenzwert wurde gewählt, sodass die Sichtbarkeit gegeben ist, während der Unterschied zu dickeren Stäben weiterhin erkennbar bleibt.

Es wird von einem Warnsignal in Form eines Signalfeuers bei Tag und bei Nacht an der Tragestruktur ausgegangen, welches nicht explizit in den Visualisierungen dargestellt wird. Des Weiteren sind die Rotorblätter, die Gondel und die Tragestruktur nach der Vorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen markiert [71]. Die Tragestruktur wird in einem gut sichtbaren Orange eingefärbt, während die Gondel und die Rotorblätter eine signalrote Farbe erhalten.

Zum Zwecke der Darstellung wird eine Schwimmplattform aus einer Mischung der Konzepte der VoltturnUS-S Referenzschwimmplattform [63] und dem Schwimmplattformdesign für MRWEA von Wind Catching Systems [20] verwendet. Die Tragfähigkeit und die hydrodynamischen Eigenschaften sind nicht überprüft und die Plattform dient nur zu Anschauungszwecken. Sie wird mit einer gelben Signalfarbe ausgeführt und in Abbildung 19 dargestellt.

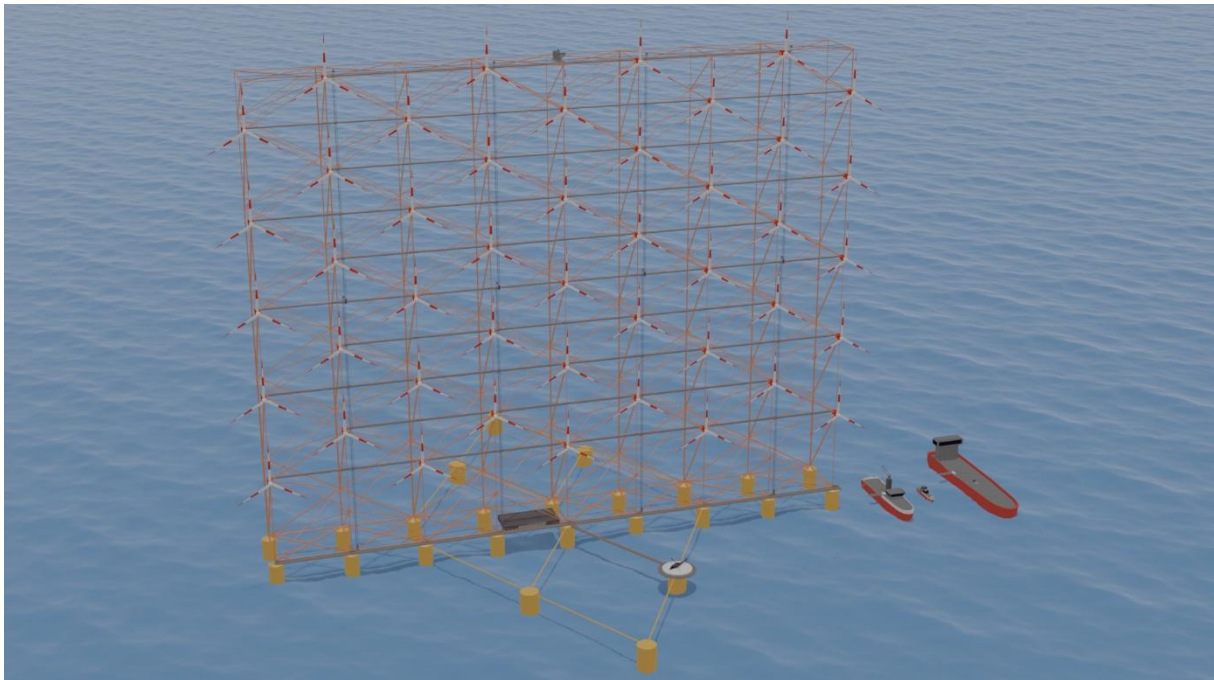


Abbildung 19: Visualisierung der vertikalen Tragestruktur mit Querverstrebungen in Blender [77]

Die Yaw-Regelung soll mit Hilfe eines einzelnen in Windrichtung liegenden Ankerpunkts an der Plattform umgesetzt werden. Der Ankerpunkt wird auf Luvseite der Rotoren unterhalb des vordersten Treibkörpers festgesetzt. Somit kann die Plattform in Windrichtung getragen werden bis die Ankerkette auf genug Spannung gesetzt wird, um der Windkraft entgegenzuwirken. Dann bewirkt der Wind eine Yaw-Ausrichtung der Anlage mit dem Ankerpunkt als Schwenkpunkt. Der Ankerpunkt kann alternativ unter den luvseitigen Treibkörper mit mittlerer Position unterhalb der Tragestruktur gesetzt werden. Die Auswirkungen auf die Yaw-Regelung wären jedoch geringer und man müsste unterstützend die Rotoren der MRWEA zur Yaw-Regelung schalten.

Als Anlegepunkt der Schiffe wird seitlich an der Schwimmplattform direkt angrenzend an die Tragestruktur angedacht. An diesem Punkt treten die geringsten Höhenbewegungen durch

Nicken der Schwimmplattform auf. Die Nickbewegung der Plattform wird aufgrund der Form der Schwimmplattform und der Lage des Ankerpunkts deutlich höher als die Roll- oder die Gierbewegung eingeschätzt. An dem gewählten Anlegepunkt der Schiffe sollte somit die signifikante Wellenhöhe den größten Einflussfaktor auf die Bewegung zwischen Schiff und Schwimmplattform ausüben [72]. Des Weiteren gibt es an diesem Ort keine anderen Bestandteile der Schwimmplattform, mit denen das Schiff kollidieren könnte.

Für die Landefläche der Helikopter wird der Standort auf einer der beiden luvseitigen Treibkörper mit mittlerer Entfernung zur Tragestruktur gewählt. Dieser Standort bietet den nötigen Sicherheitsabstand zu Strukturen, damit der Helikopter landen kann und weist trotzdem einen geringen Weg des Personals oder der Teile zum Einsatzort auf. Zudem muss keine weitere Struktur zum Tragen des Helikopterlandeplatz erstellt werden. Ein Landeplatz auf der obersten Ebene der Tragestruktur wird aufgrund der auftretenden Bewegung in dieser Höhe auf einer Schwimmplattform als ungeeignet eingeschätzt. Der Helikopterlandeplatz wird mit Orientierung an der Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Genehmigung der Anlage und des Betriebs von Hubschrauberflugplätzen erstellt [73].

Der vertikal und horizontale Transport von Kleinteilen und Personal kann in verschiedenen Kombinationen ausgeführt werden. Zum Beispiel kann es einen zentralen Vertikaltransport mit Horizontaltransport auf jeder Ebene der Tragestruktur geben oder es wird bei der vertikalen Tragestrukturanordnung für jede Rotorspalte ein Vertikaltransport ausgeführt, sodass der Horizontaltransport nur in der untersten Ebene der Tragestruktur stattfinden muss. Zu diesen gibt es noch viele weitere Möglichkeiten. Für den Zweck der Repräsentation verschiedener Transportmöglichkeiten wird in der Darstellung, wenn es aus Gründen der Systemintegration nicht anders geplant ist, eine Kombination von Vier Vertikaltransporten zu Horizontaltransporten auf jeder Tragestrukturebene ausgeführt.

Die dargestellten Leitern werden nach DIN EN ISO 14122-4 erstellt [74]. Geländer an Laufstegen werden auf Grundlage der DIN 18065 mit einer Höhe von 1,2 m ausgeführt [75]. Nötige Hilfstragestrukturen für die Transportmöglichkeiten werden aus Vereinfachungszwecken nicht berechnet und simplifiziert dargestellt. Im Falle der Laufstege werden die nötigen Hilfstragestrukturen größtenteils nicht dargestellt, um die Anschaulichkeit der Tragestrukturanordnung beizubehalten.

Die restlichen Transportlösungen werden für die entsprechenden Varianten repräsentativ zum Konzept dargestellt. Da die Liftplattform als Großteiltransport kein weit verbreitetes Konzept ist orientiert sich die Darstellung an dem Konzept von Wind Catching Systems [20]. Bei dem Greifarm als Großteiltransport bestehen die gleichen Umstände und das Design wird an das Konzept von WindSpider angelehnt [36]. Das Absetzen der Bauteile von der Tragestruktur mit dem Kran wird mit Hilfe einer Ausgleichstraverse dargestellt, da diese einen geringeren Darstellungsaufwand als das Absetzen mit einem zusätzlichen Befestigungspunkt darstellt.

Serviceaufzüge an WEAs besitzen in der Regel eine maximale Fahrwegshöhe von 200 m, weshalb der Aufzug in zwei Etappen ausgeführt wird [76].

Variante 32 und 37 benötigen für die Ausführung zusätzliche Hilfsstrukturen zum Tragen der Liftplattformen oder Greifarme. Deshalb werden sie an der vertikalen Tragestruktur ohne Querverstrebungen visualisiert. Diese weist eine geringere Anzahl an Stäben als die anderen Tragestrukturen auf und erhöht somit die Überschaubarkeit im Zusammenhang mit den Hilfsstrukturen. An der vertikalen Tragestruktur mit Querstreben werden Variante 72 und 25 dargestellt und Variante 71 und 21 werden an der horizontalen Tragestruktur verbildlicht.

In der Visualisierung zu Variante 32 wird der Transport des Rotorblattes auf die Liftplattform mit Hubwagen anstatt des vorgesehenen Krans ausgeführt. Eine Ausführung mit Kran benötigt zusätzliche Strukturen, welche die Anschaubarkeit beeinträchtigen und eine Umsetzung mit den zuvor dargestellten Portalkränen benötigt eine komplizierteres Design der Hilfsstruktur der Liftplattform.

Bei Variante 71 und 21 an der horizontalen Tragestruktur wird der Transport mit dem zentralen Kran direkt zum Deck des SOVs gezeigt. Dies ist zwar nicht direkt in dieser Weise vorgesehen, aber es stellt eine mögliche Transportstrategie an Tragestrukturen dar, welche breiter als ihre zugehörige Schwimmplattform sind, ohne einen Schwenkkran verwenden zu müssen. Zudem bringt es einen Unterschied zu der Betrachtung des Krans in Variante 72 und 25.

Für diese Arbeit wurde die finale Visualisierung der Varianten in Blender durchgeführt [77]. Weiterhin wurden in Blender Animationen des Transportablaufes erstellt und gerendert, um die Präsentationsvideos der Varianten zu erhalten. Die erstellten Videos sind zu der Ausarbeitung beigelegt.


4 Durchführung der Konzeptanalyse

Die in Kapitel 3 erstellten Konzepte und Varianten sollen in diesem Kapitel möglichst mit auf dem Markt erhältlichen Systemen erfüllt werden. Mit den realen Systemen kann eine detaillierte Analyse des Gewichts, der Geschwindigkeit und der Kosten der Varianten getroffen werden. Diese Daten werden anschließend in einen Zusammenhang gesetzt, um sie in der Auswertung in Kapitel 5 zu bewerten und Rückschlüsse zu ziehen.

4.1 Konkretisierung der Konzepte

Zur Konkretisierung der Konzepte werden reale Lösungen zu bestehenden Systemen aufgelistet. Zu jeder der Anlagen wird ein Steckbrief, wie in Tabelle 13, mit den wichtigsten Parametern für dieses System auf der MRWEA erstellt.

Tabelle 13: Steckbrief zum Palfinger PTM 1500 Kran

Name	PTM 1500
Hersteller	Palfinger
Bild	
Gewicht [kg]	12.800
Kosten [€]	(650.000)
Max. Hubgewicht [kg]	15.000
Reichweite [m]	8 - 20
Max. Hebemoment [kNm]	1.200
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Hubgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Offshore geeignet
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	Aktive Bewegungskompensierung, Fernsteuerbar
TRL	9
Systemkompatibilität	Geeignetes Hubgewicht und Reichweite mit Teleskoparm, Hubhöhe unbestätigt, Zubau der Schienenführung nötig
Quelle	[78]

Für die Steckbriefe werden Systeme ausgesucht, welche optimal bereits für den offshore Betrieb ausgelegt sind. Zudem sollten sie den Anforderungen der Anforderungsliste entsprechen und die Maße abdecken, die den Modellen in Kapitel 3.5 abgeleitet werden. Gewicht, Kosten und Geschwindigkeit der Systeme wird aufgezeigt, um den späteren Vergleich zu ermöglichen. Unter dem Punkt der Systemkompatibilität wird kurz betrachtet, ob die aufgeführte Anlage mit der beschriebenen MRWEA kompatibel ist. Die Gesamtheit der Steckbriefe ist im Anhang von Tabelle 54 bis Tabelle 82 zu finden.

Der Großteiltransport wird zum einen für das Heben der Rotorblätter aufgelistet und zum anderen für das Verfahren des Getriebes. Beim Ausschließlichen Transport der Rotorblätter, muss die MRWEA für das Ersetzen von Gondelbauteilen mitsamt der Schwimmplattform in einen Hafen geschleppt werden. Es soll ein grober Abgleich getroffen werden, welcher der Fälle in Hinsicht auf die Kosten und des Gewichts günstiger ist.

Bei den Kränen wird das Rotorblatt mit Hilfe einer Ausgleichstraverse verfahren, weswegen das zu hebende Gewicht sich verdoppelt. Das Hubgewicht der Anlage muss somit mindestens 5.428 kg entsprechen. Der Ausstand des Kranarms muss zwischen 12 m und 20 m verfahrbar sein, sodass der Kran die Bauteile verfahren kann, aber der Kranarm bei Betrieb der Rotoren nicht mit diesen kollidiert. Das Gewicht mit den 20 m Arbeitsabstand ergibt ein nötiges Hebemoment von mindestens 1.065 kNm. Das Kranen des Getriebes soll mit zusätzlichen Aufhängungspunkten und ohne Ausgleichstraverse stattfinden. Das Hubgewicht entspricht somit den 22.000 kg des Getriebes und der benötigte Ausstand ist derselbe wie oben genannt. Hiermit ergibt sich ein nötiges Hebemoment von 4.316 kNm. Die Hubhöhe beider Kranvorgänge ist auf die Tragestrukturhöhe von 323,75 m angesetzt. Für den Großteiltransport per Greifarm und Plattform gilt nur das einfache Rotorblattgewicht. Die Hubhöhe und das Getriebegewicht sind wie bei den Kränen ausgelegt.

Die Fahrwegshöhe des vertikalen Personal- und Kleinteiltransport kann, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, keine 200 m überschreiten und wird somit auf 170 m aus den entsprechenden Modellen festgelegt.

Um die geforderten Informationen zu den Anlagen zu erhalten, werden die Daten von den in den Steckbriefen angezeigten Quellen entnommen, wie sie auch in Tabelle 13 zu sehen ist. Zudem werden die fehlenden Informationen zu den Steckbriefe zu jeder der Anlagen per E-Mail erfragt [79]. Die Firmen Wind Catching Systems, PTB Special Products, Käufer Befahrtechnik und Avanti sendeten detaillierte Antworten. WindSpider und Enabl haben geantwortet, konnten jedoch keine genauen Details mitteilen, da die angefragten Systeme eine zu geringe Größenordnung für ihre Produkte aufwiesen. Die restlichen Firmen gaben keine Antwort.

Wie in Tabelle 13 gezeigt kommt es durch fehlende Informationen zu Lücken in den Steckbriefen. Für die folgenden Betrachtungen werden die Informationslücken mit den Parametern von Anlagen in derselben Systemfunktion ausgefüllt. Bei den simpleren Anlagen, wie der Leiter, werden die Werte in späteren Berechnungen ermittelt. Fehlen weiterhin Informationen, die nicht mit denselben Systemfunktionen oder Berechnungen angenähert werden können und relevant für die späteren Betrachtungen sind, werden diese Informationen auf Basis vergleichbarer Systeme geschätzt. Geschätzte Werte in den Steckbriefen werden in Klammern angegeben.

Die Charterkosten für CTV, SOV und Helikopter werden von allgemeinen Werten übernommen, während die restlichen Werte den spezifischen Schiffen entsprechen [80]. Dies gilt ebenso für Lastschiffe [81].

4.2 Gewichtsbehandlung

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie das Gewicht der Strukturen und der Gesamtanlage bestimmt wird und wie hieraus Rückschlüsse zu dem Preis der Strukturen getroffen werden.

Zunächst werden die Tragestrukturvarianten betrachtet. Um das Gewicht der Struktur zu berechnen, wird das Volumen der Stäbe bestimmt und mit der Dichte des ausgewählten Stahls multipliziert. Die Stabdicken D_{Stab} und Profildicke $r_{t,b}$ aus Kapitel 3.5 ergeben die Fläche des Stabprofils. Multipliziert mit der Stablänge l_{Stab} und über alle Stäbe aufsummiert ergibt sich hieraus das Stabvolumen V_{Stab} , wie in Formel 17 gezeigt.

$$V_{Stab} = \sum_{i=0}^n l_{Stab,i} \frac{\pi}{4} \left(D_{Stab,i}^2 - \left(D_{Stab,i} (1 - 2r_{t,b}) \right)^2 \right) \quad (17)$$

Das Gewicht der Stäbe m_{Stab} ergibt sich nach Formel 18 aus der Multiplikation des Stabvolumen und der Stahldichte ρ_{S355} des S355 Stahls von $7850 \frac{kg}{m^3}$ [82].

$$m_{Stab} = V_{Stab} \rho_{S355} \quad (18)$$

Zudem können mit den spezifischen Stahlkosten k_{S355} von $5,95 \frac{\text{€}}{kg}$ die Kosten für die Tragestrukturen $K_{Struktur}$ über Formel 19 berechnet werden [83].

$$K_{Struktur} = m_{Stab} k_{S355} \quad (19)$$

Die entsprechende Berechnungstabelle ist im Anhang von Tabelle 83 bis Tabelle 85 zu finden und die Ergebnisse werden in Abbildung 20 und 21 gezeigt.

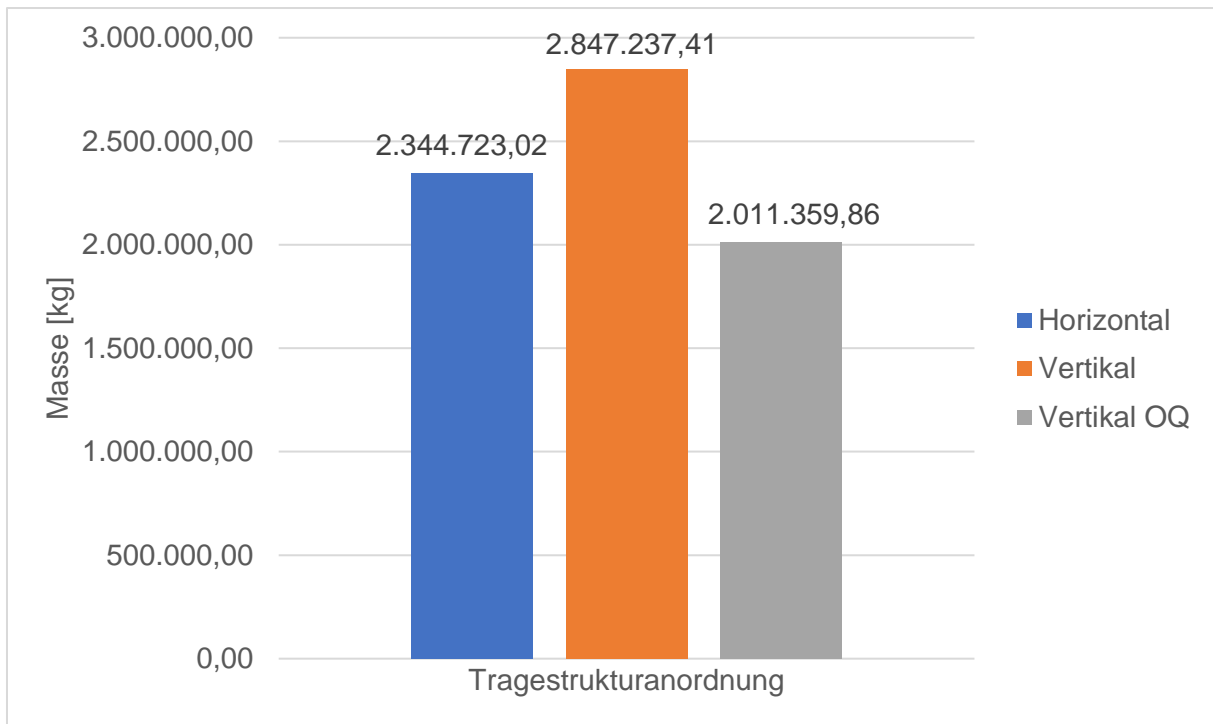


Abbildung 20: Masse der Tragestrukturanordnungen

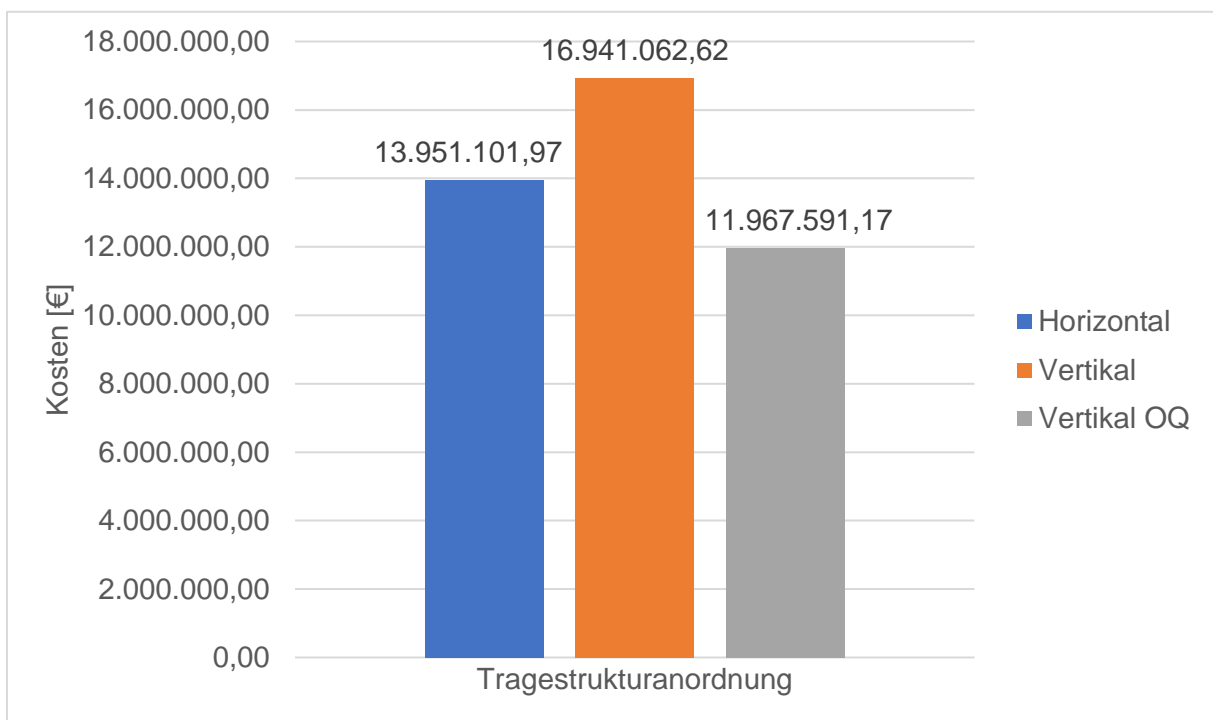


Abbildung 21: Kosten der Tragestrukturanordnungen

Wie in den Abbildungen 20 und 21 gezeigt, sind die Ergebnisse des Gewichts und der Kosten anhand der Berechnung proportional zueinander, weshalb das Verhältnis zwischen den verschiedenen Tragestrukturvarianten in beiden Betrachtungen gleich ausfällt. Die vertikale Tragestrukturanordnung ohne Querstreben (OQ) weist die geringsten Werte mit einer Masse von 2.011 t und Kosten von 11,968 M€ auf. Die höchsten Werte erzielt die vertikale Tragestrukturanordnung mit Querstreben. Die Masse beträgt 2.847 t und die Kosten

16,941 M€. Die Differenz zwischen den beiden Tragestrukturen liegt bei 836 t oder 4,973 M€. Für die horizontale Tragestrukturanordnung wurden Werte von 2.345 t und 13,951 M€ errechnet.

Aufgrund des geringeren Gewichts und der damit niedrigeren Kosten wird in späteren Betrachtungen nur noch die vertikale Tragestrukturanordnung ohne Querstreben betrachtet.

Anschließend werden die Laufstege nach den Maßen in der Modellierung und einem Gewicht pro Meter von 152,7 kg berechnet [84]. Die Kosten belaufen sich auf 860,22 € pro Meter. Insgesamt ergeben die Laufstege an der vertikalen Tragestruktur eine Masse von 607,5 t bei einem Preis von 3,422 M€. Der Laufsteg zur Helikopterlandeplattform wird hierbei nicht einbezogen.

Die Hilfsstrukturen von Großteiltransport Greifarm, Großteiltransport Liftplattform, und Aufzug, sowie die Leitern, Schienen, Schienenführungen und die Lagerhalle werden vereinfacht berechnet. Die meisten Strukturen werden als Stäbe angenommen und wie in Kapitel 3.5 beschrieben, berechnet. Masse und Kosten werden, wie oberhalb in Formel 17 bis 19 berechnet. Die Lasten werden aus der Anforderungsliste aus Kapitel 3.2 oder den Steckbriefen aus Kapitel 4.1 entnommen. Die Hilfsstrukturen der Großteiltransport werden hierbei nach der Beschreibung in Kapitel 4.1 zweifach ausgelegt. Zum einen für den Rotorblatttransport und zum anderen zum Transport größerer Bauteile. Die Hilfsstruktur der Liftplattform wird durch vier vertikale Stange pro vertikaler Rotorenspalte repräsentiert, die der Höhe der Tragestruktur entsprechen. Bei der Greifarmhilfsstruktur handelt es sich um zwei vertikale Stangen für jede Rotorenspalte mit derselben Länge der Plattformhilfsstruktur. Horizontale Führungen für den Greifarm, wie in der Visualisierung sind auch betrachtet, werden jedoch wegen der deutlich erhöhter Masse nicht weiter berücksichtigt.

Die meisten Hilfsstrukturen und Bauteile werden vereinfacht nicht als Einfluss auf die Tragestruktur ausgelegt. Ausnahme hierzu sind die Laufstege und der zentral verfahrbare Kran. Um den Einfluss der zusätzlichen Lasten auf die Tragestruktur zu ermitteln, werden die Lasten, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, in Femap an dem Modell der vertikalen Tragestruktur simuliert. Die Zwei verschiedenen Kranlasten werden jeweils an drei verschiedenen Stellen des Modells simuliert, um den Einfluss des Kran an jeder Position anzunähern. Die Positionierungen sind eine Mittstellung der Last, Positionierung der Last an der Kante der Tragestruktur und ein Zwischenstellung zwischen beiden Positionen. Die Last der Laufstege wird einzeln an den in der Visualisierung gezeigten Stellen untersucht und geht auch als Last in die Kransimulationen ein. Somit sind sieben Simulationen benötigt. Die Stabkräfte werden wie zuvor aus Femap entnommen und in die Stabdicken umgerechnet. Die Stabdicken werden nach der oberhalb beschriebenen Methodik in das Gewicht der Tragestruktur und deren

Kosten umgewandelt. Die Stabdicken der verschiedenen Positionierung werden hierbei überlagert, um die maximal nötige Stabdicke pro individuellen Stabsegment abzudecken. Hierdurch kann der Einfluss des Krans auf die Masse der Tragestruktur zu den benötigten Hilfsstrukturen der anderen Großteiltransporte verglichen werden und der Unterschied zwischen den zwei genannten Belastungen untersucht werden.

Alle Oberhalb genannten Berechnungen sind im Anhang in Tabelle 86 bis Tabelle 100 hinterlegt.

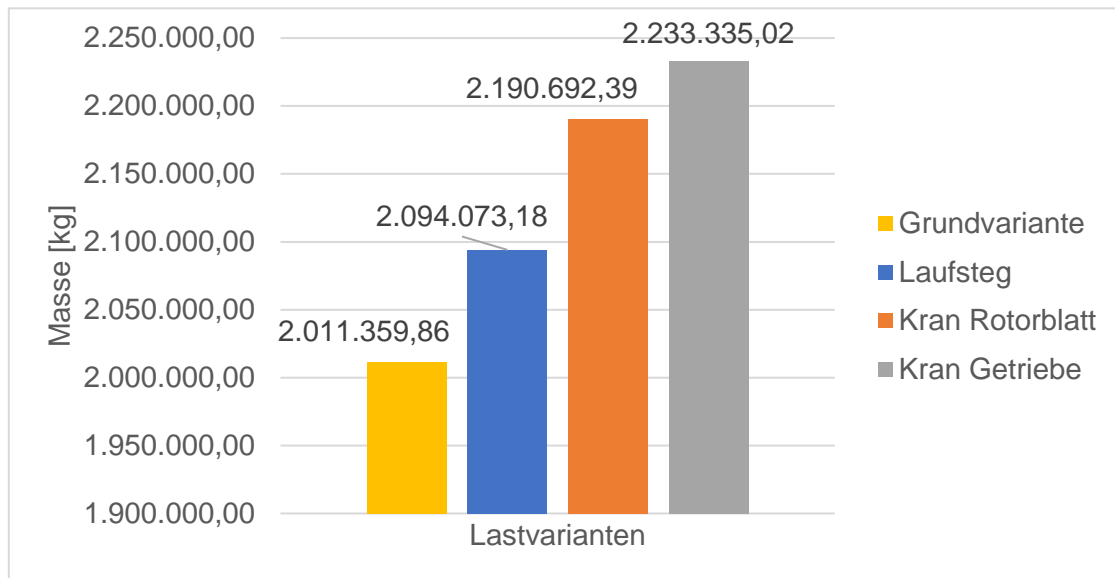


Abbildung 22: Masse der Tragestruktur mit verschiedenen Lasteinflüssen

Abbildung 22 zeigt die Masse der Tragestruktur mit unterschiedlichen Lasten auf diese. Die Grundvariante entspricht der vertikalen Anordnung ohne Querstreben. Diese wurde im nächsten Lastfall um die Last des Laufstegs ergänzt. Zusätzlich zu der Laufsteglast wird in zwei weiteren Fällen die Belastung durch den Kran bei einem Rotorblattwechsel oder einem Getriebewechsel überlagert. Die Laufstege erhöhen die Masse der Tragestruktur um 82,7 t auf eine Gesamtmasse von 2.094,1 t. Der Rotorblattwechsel mit Kran erzielt eine Masse von 2.190,7 t und beim Getriebewechsel weist die Tragestruktur die höchste Masse mit 2.233,3 t auf. Die Differenz zwischen den Kranvarianten beträgt 42,6 t.

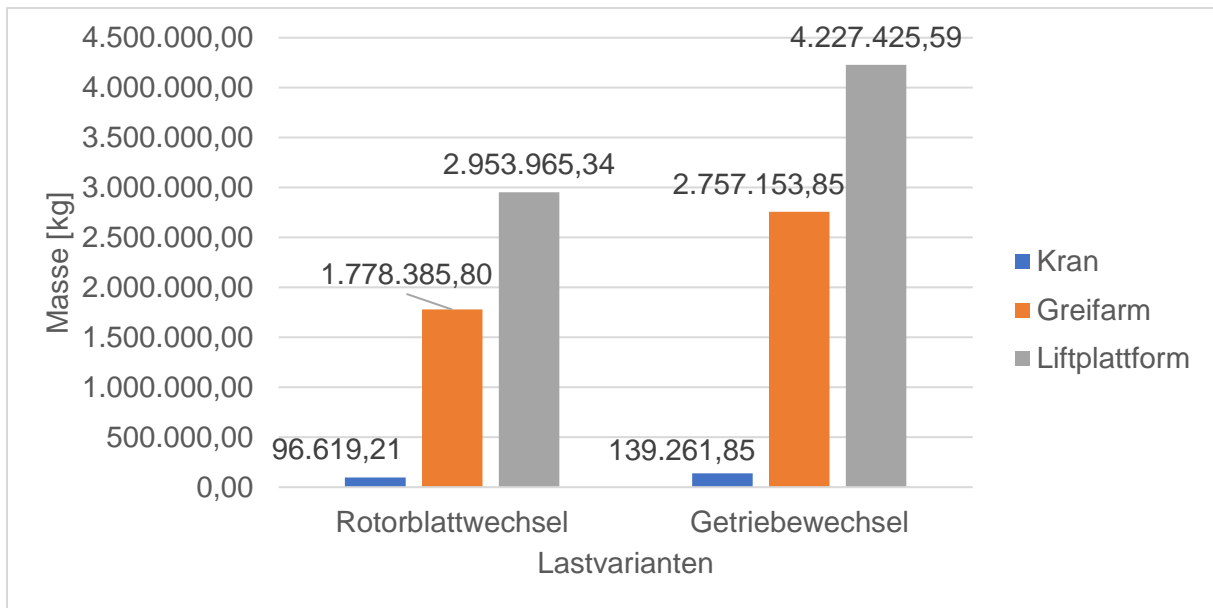


Abbildung 23: Masse der Hilfsstrukturen der Großteiltransporte bei unterschiedlichen Lasten

In Abbildung 23 werden die Massen der Hilfsstrukturen der Großteiltransporte bei den Lastfällen von Rotorblattwechsel und Getriebewechsel dargestellt. Für den Kran entspricht dies der Erhöhung des Tragestrukturgewichts aufgrund der Kranlast. Die Greifarmhilfsstruktur ist deutlich schwerer als die des Krans und die Plattformhilfsstruktur weist wiederum eine signifikant erhöhte Masse zu der Greifarmstruktur auf. Die Masse bei dem Getriebewechsel sind für jedes System höher als bei dem Rotorblattwechsel, wobei der Unterschied bei Greifarm und Plattform größer ist als bei dem Kran. Die höchste Masse wird mit 4.227,4 t bei der Plattformstruktur für den Getriebewechsel erzielt. Das geringste Gewicht liegt mit 96,6 t bei der Kranstruktur für den Rotorblattwechsel.

Aufgrund der hohen Differenzen zwischen dem Strukturgewichten von Greifarm und Plattform bei den beiden Lastvarianten wird im weiteren Verlauf nur der Rotorblattwechsel als Lastfall betrachtet.

Das bestimmte Gewicht der Strukturen, sowie die bestimmten Bauteilmassen aus Kapitel 3.2 und der Steckbriefe aus Kapitel 4.1 können nun in den ausgewählten Varianten aus Kapitel 3.4 kombiniert werden. Somit wird das Gesamtgewicht der MRWEA ohne Schwimmplattform für jede der Varianten ermittelt. Für die Varianten mit Lagerung wird entsprechend der Variante das Gewicht von acht Rotorblättern und 8 Sets an Kleinbauteilen addiert. Diese Gesamtgewichte der Varianten werden in Abbildung 24 dargestellt und sind in der Tabelle 101 im Anhang zu finden.

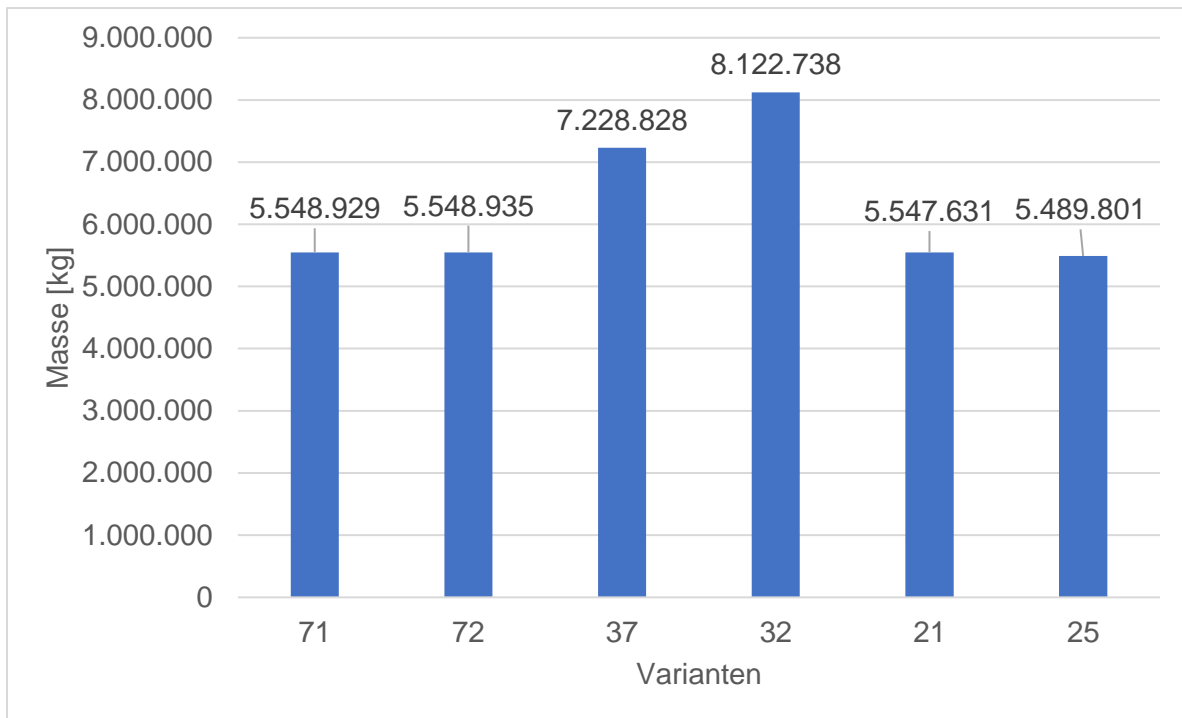


Abbildung 24: Gesamtgewicht der ausgewählten Varianten

Wie in Abbildung 24 gezeigt liegen die Gesamtmassen der Varianten 71, 72, und 21 in einem ähnlichen Bereich von etwa 5.548 t. Die Varianten 37 und 32 erzielen dagegen deutlich erhöhte Gesamtmassen. Variante 37 besitzt eine Masse von 7.229 t und Variante 32 besitzt die höchste Gesamtmasse von 8.123 t. Die niedrigste Masse liegt bei Variante 25 mit 5.490 t.

4.3 Zeitbetrachtung

Die Zeitbetrachtung der Wartungsabläufe an der MRWEA in diesem Kapitel wird über die Verrechnung der zurückzulegenden Strecken mit der Geschwindigkeit der Wartungssysteme durchgeführt. Kenntnis über die Zeit der Wartungsabläufe lässt Rückschlüsse auf die Lohnkosten und die während der Wartung nicht produzierten Energiemenge zu.

Für diese Betrachtung wird die Entfernung der MRWEA zu dem nächsten Hafen auf 100 km festgelegt. Die Entfernungen an der Anlage werden aus der Modellierung in Kapitel 3.5 entnommen. Aus den Steckbriefen in Kapitel 4.1 werden die Geschwindigkeiten der Anlagen erhalten. Tätigkeiten bei denen die Angestellten Laufen werden auf eine Geschwindigkeit von $4 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ gesetzt [111]. Die Wartungsabläufe, die keine Systembewegung erfordern, werden als zusätzliche Zeit auf die Berechnungen addiert [112]. Somit ergibt sich die Formel 20 zur Berechnung der Dauer eines Ablaufs t_{Ablauf} mit der Strecke der Tätigkeit S , Geschwindigkeit der Systeme v_{System} und der zusätzlichen Zeit bei Wartungen t_{Zusatz} .

$$t_{Ablauf} = \frac{S}{v_{System}} + t_{zusatz} \quad (20)$$

Die Entfernungen und Zeiten hängen von der Art und Aufgabe der Wartungstätigkeit ab. Die folgenden Aufgaben werden für die Wartungstätigkeiten definiert. Die Inspektion aller Rotoren an der MRWEA. Die Wartung an kleinen Bauteilen der zweiten und dritten Gondel der Rotoren in der obersten Rotorenzeile der vertikalen Anordnung. Eine geringfügige Reparatur der Rotorblätter an denselben Rotoren der vorherigen Wartungsaufgabe. Abschließend der Rotorblattwechsel eines Rotorblattes an jeweils dem ersten und vierten Rotor der obersten Rotorenzeile an der vertikalen Anordnung. Die oberste Rotorenzeile wird gewählt, um den gesamten Einfluss des vertikalen Transportes zu ermitteln. Sie stellt das Worst-Case-Szenario dar und wird die höchsten Zeiten erzielen.

Die Strecken werden für jede Wartungsaufgabe erstellt, sodass das Personal und die benötigten Teile aus dem Hafen zur Anlage transportiert werden. Dort wird die entsprechende Aufgabe absolviert und anschließend werden Personal und Restteile zurück zum Hafen transportiert. Ausnahme hierzu sind die Inspektion über installierte Kameras und die Lagerung von Bauteilen auf der MRWEA. Bei der Bauteillagerung wird definiert, dass die entsprechenden Teile einmal bei der MRWEA ankommen. Zwei Sätze an Teilen für die jeweiligen Aufgaben werden direkt verfahren, während acht der Bauteilsets in das Lager transportiert werden. Mit dieser Menge an Bauteilen im Lager können die nächsten vier Wartungseinsätze für die verschiedenen Aufgaben absolviert werden, wobei eine angepasste Strecke zurückgelegt wird. Die Zeiten der jeweiligen Aufgaben mit Lagerung werden über diese fünf Einsätze gemittelt.

Im Anhang sind die für die Dauer der Wartungseinsätze verwendeten Berechnungstabellen unter Tabelle 102 bis Tabelle 113 zu finden. Die Ergebnisse werden in Abbildung 25 bis 28 dargestellt. Sie sind in die Dauer einschließlich und ohne Antransport eingeteilt, um den Einfluss dieses Anteils aufzuzeigen. Zudem ist die Variante 71 ein weiteres Mal ohne Lagerung (OL) ausgeführt. Dies soll eine Untersuchung des Einflusses der Lagerung ohne eine Änderungen in den anderen Wartungssystemen und ohne Auslegung des Antransportes auf die Lagerung ermöglichen.

Die Dauer der Inspektion von den verschiedenen Varianten in Abbildung 25 zeigt, dass die Varianten 71, 72 und 32 die gleiche Zeit von 460 Minuten für eine Inspektion benötigen. Dies ist die geringste Inspektionsdauer und bleibt mit und ohne Antransport unverändert. Variante 25 weist nur eine geringfügig höhere Inspektionsdauer mit 478 Minuten ohne Antransport auf und mit Antransport sind es 535 Minuten. Bei den Varianten 21 und 37 liegt mit jeweils

520 Minuten und 583 Minuten Inspektionszeit ohne Antransport eine höhere Dauer als bei den anderen Varianten vor. Die Dauer mit Antransport liegt für die beiden Varianten deutlich erhöht bei 1061 Minuten und 1124 Minuten. In beiden Fällen nimmt Variante 37 den Maximalwert ein.

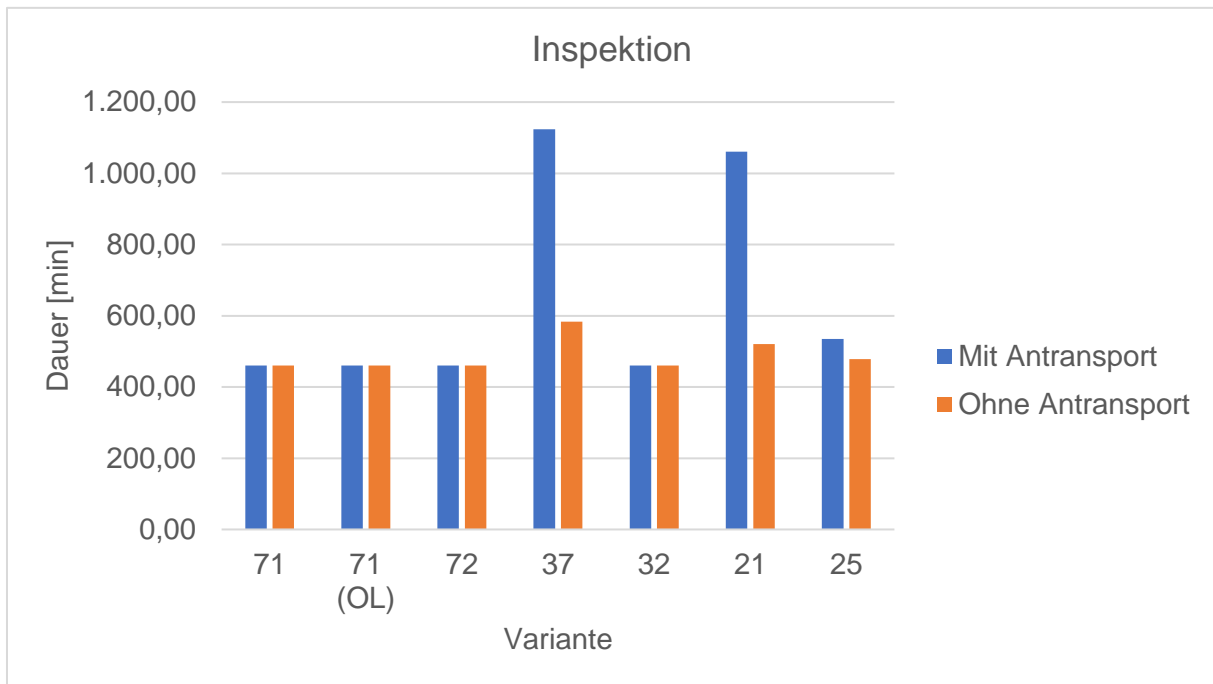


Abbildung 25: Dauer der Inspektion

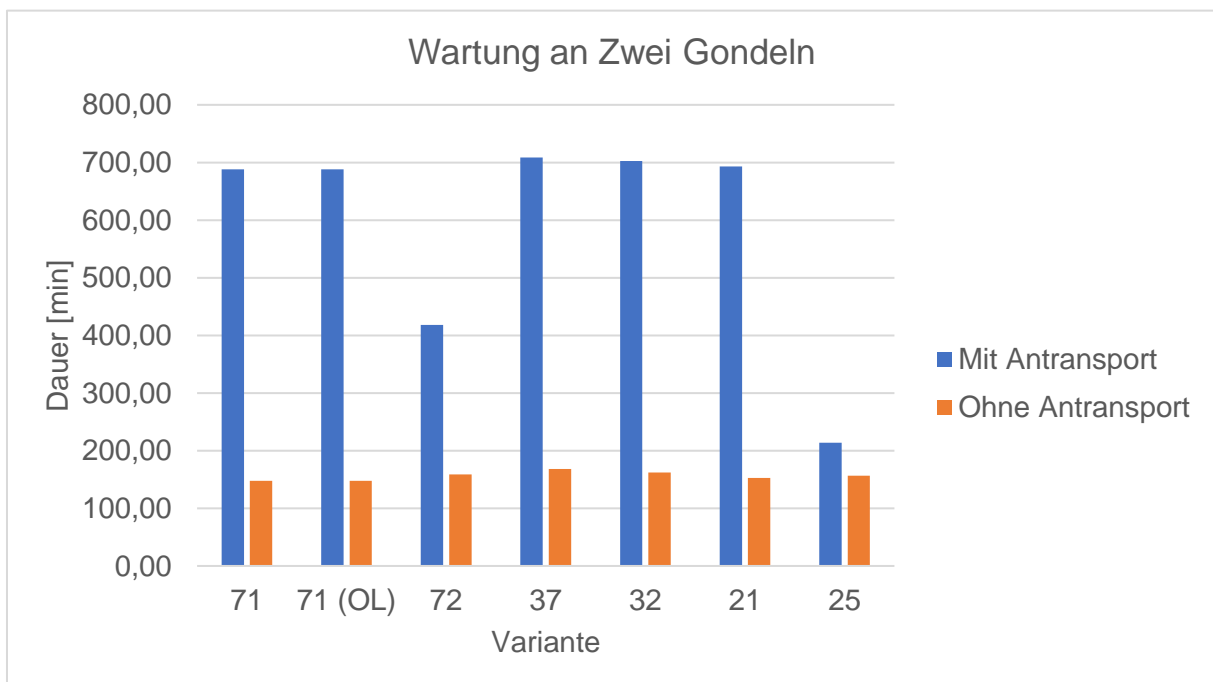


Abbildung 26: Dauer der Kleinteil Wartung

Abbildung 26 stellt die Dauer von Wartungseinsätzen an zwei Gondeln für die verschiedenen Varianten dar. Die Wartungsdauer ohne Antransport fällt für alle Varianten in einem ähnlichen Bereich von 147 Minuten bis 168 Minuten aus. Hierbei stellt Variante 71 den Minimalwert des Bereiches dar und Variante 37 den Maximalwert. Variante 71, 37, 32 und 21 weisen mit

Betrachtung des Antransportes weiterhin eine ähnlich Dauer von 688 Minuten in Variante 71 bis zu 709 Minuten in Variante 37 auf. Signifikant geringere Wartungsdauern mit Antransport liegen bei Variante 72 mit 418 Minuten und Variante 25 mit dem geringsten Wert von 214 Minuten vor.

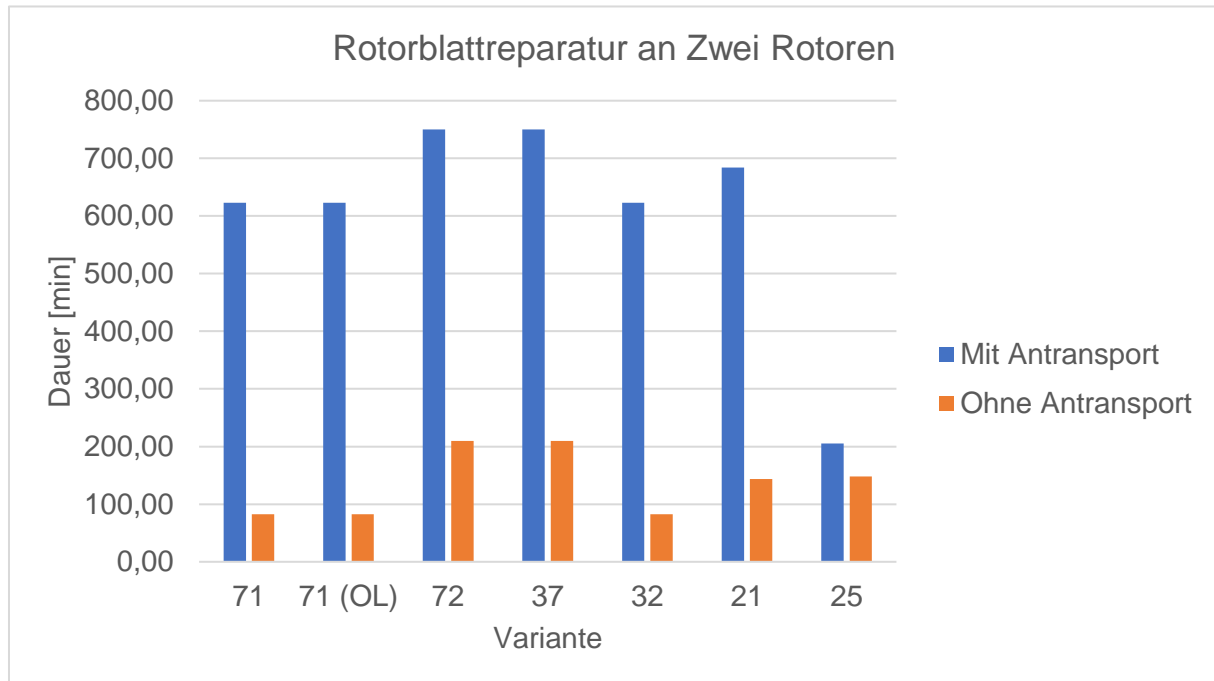


Abbildung 27: Dauer der geringfügigen Rotorblattreparatur

Wie in Abbildung 27 zu sehen, weisen Variante 71 und 32 dieselben Zeiten für die Rotorblattreparatur ohne und mit Antransport vor. Mit Antransport liegt die Zeit bei 623 Minuten. Ohne Antransport beträgt die Dauer 83 Minuten, was dem geringsten Wert unter den Varianten entspricht. Variante 72 und 37 weisen ebenfalls dieselben Zeiten auf. Diese sind mit 750 Minuten mit Antransport und mit 210 Minuten ohne Antransport jeweils die Maximalzeiten der Varianten. Bei Variante 21 und 25 liegen mit 144 Minuten und 148 Minuten ähnliche Zeiten ohne Antransport vor, wobei sie bei Variante 25 höher ist. Jedoch ist die Zeit mit Antransport für Variante 25 mit 205 Minuten deutlich geringer als bei Variante 21 mit 684 Minuten und stellt zudem den Minimalwert der Varianten mit Antransport dar.

Der Rotorblattwechsel der Varianten 71, 72, 21 und 25 ohne Antransport in Abbildung 28 liegt in einem ähnlichen Bereich zwischen dem niedrigsten Wert von Variante 71 (OL) mit 155 Minuten und dem Wert von Variante 25 mit 168 Minuten. Die Dauer von Variante 71 liegt mit 163 Minuten höher als bei derselben Variante ohne Lagerung. Variante 37 mit 200 Minuten und Variante 32 mit 217 Minuten weisen höhere Wechselzeiten auf als die anderen Varianten ohne Antransport. Mit Antransport zeigt Variante die geringste Dauer mit 261 Minuten gefolgt von Variante 72 mit 423 Minuten. Das Verhältnis der Varianten 71, 37, 32 und 21 verhält sich

mit Antransport wie ohne Antransport. Variante 32 besitzt die höchste Wechseldauer mit Antransport von 758 Minuten.

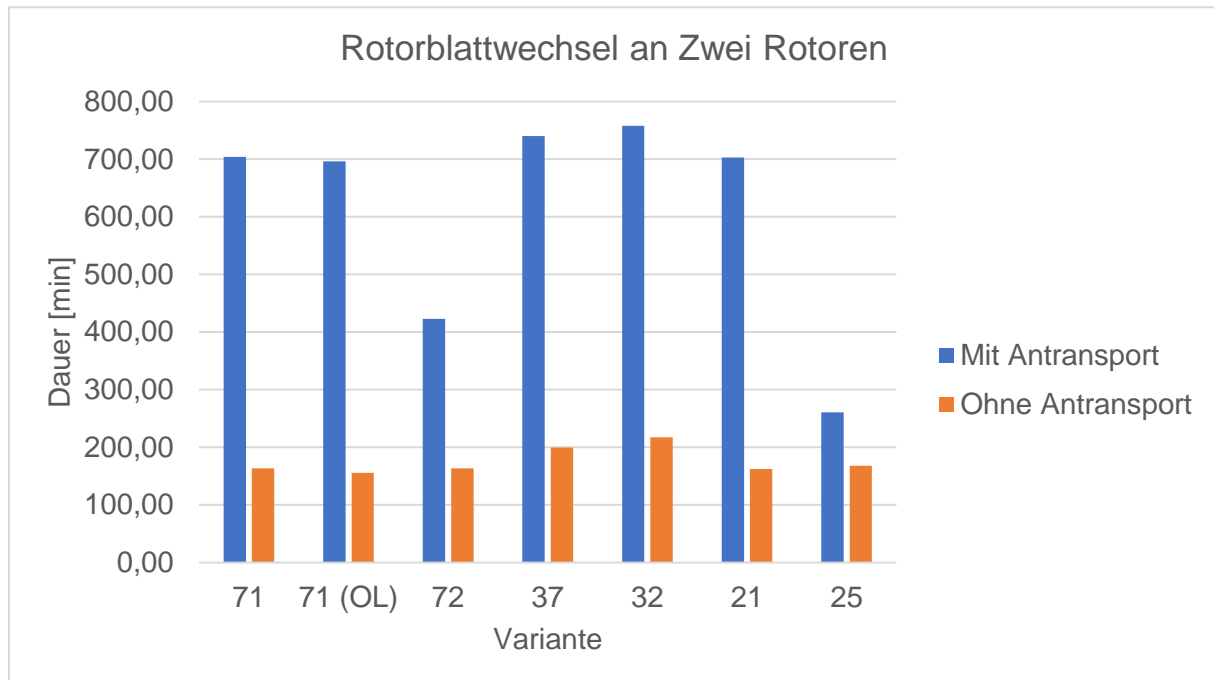


Abbildung 28: Dauer des Rotorblattwechsels

Mit den Zeiten für die verschiedenen Wartungsaufgaben der Varianten können folgend die jährlichen Arbeitsstunden an der MRWEA für die Varianten berechnet werden.

Die Anzahl der jährlichen Inspektionen liegt, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, bei Zwei. Die Rotorblätter müssen Aufgrund von Korrosion im offshore Bereich alle vier Jahre repariert werden [113]. Da die Rotoren der MRWEA erheblich geringere Radien als bei ERWEA aufweisen, verfügen sie über signifikant geringere Umlaufgeschwindigkeiten. Somit sollte die Korrosion geringer ausfallen und daher wird die Reparatur auf alle fünf Jahre an einem Rotorblatt festgelegt. Bei einer Wartungsaufgabe, die zwei Rotoren von insgesamt 45 Rotoren behandelt, müssten im Durchschnitt Fünf Reparaturaufgaben pro Jahr durchgeführt werden, um diese Quote zu erfüllen. Die Wartung an der Gondel oder an anderen Bauteilen wird auf dieselbe Anzahl an Aufgaben pro Jahr festgelegt. Die Anzahl der Rotorblattwechselfaufgaben pro Jahr wird als Eins angenommen.

Multipliziert man die die Wartungsaufgabendauer mit der jeweiligen Anzahl pro Jahr und addiert sie auf erhält man die jährliche Gesamtarbeitszeit an der MRWEA für die jeweiligen Varianten. Zudem kann man somit die Anzahl an Einsätzen der Verschiedenen Antransportmittel pro Jahr bestimmen. Durch die Lagerung können hierbei Dezimalwerte auftreten. Beide der Ergebnisse werden in Tabelle 14 abgebildet.

Variante 25 besitzt mit 57 Einsatzstunden pro Jahr die geringsten Jahresstunden. Die nächstgeringste Anzahl an Jahresstunden weist Variante 72 mit 120 Stunden auf. Variante 71 und 32 haben ähnliche Jahresstunden um die 137 Stunden. Variante 21 besitzt erhöhte Jahresstunden mit 162 Stunden. Die höchsten Jahreseinsatzstunden liegen bei Variante 37 mit 171 Stunden vor.

Tabelle 14: Einsatzstunden und Transportmitteleinsätze der Varianten pro Jahr

Variante	Einsatzstunden pro Jahr [h]	CTV-Einsätze pro Jahr	SOV-Einsätze pro Jahr	Helikopter-Einsätze pro Jahr	Cargo-Einsätze pro Jahr
71	136,33	0	11	0	0
72	119,74	11	5,2	0	0
37	171,35	0	13	0	0
32	138,43	0	11	0	0
21	161,86	0	13	0	0
25	57,09	0	0	13	0,2

Weiterhin kann auf dieselbe Weise wie oberhalb mit den Zeiten der Wartungsdauer und der Anzahl an Wartungseinsätzen, vereinfacht die äquivalente Volllaststundenzahl der MRWEA bei den unterschiedlichen Varianten berechnet werden. Hierzu muss beachtet werden, wie viele der Rotoren bei den Wartungsaufgaben nicht betrieben werden können. Bei der Wartung an der Gondel werden die zu wartenden Anlagen deaktiviert. Für die anderen Aufgaben werden jeweils die betroffenen und eine nebenliegende Rotorenspalte abgeschaltet, um die Sicherheit der Arbeiter zu gewährleisten. Dies ist bei der Inspektion über Kamera und Drohne nicht nötig. Hier muss nur der zurzeit untersuchte Rotor außer Betrieb genommen werden. Die sich hieraus ergebende Stundenzahl für die gesamte Abschaltung der Anlage werden von der, auf 4.500 Stunden festgelegten, Anzahl an äquivalenten Volllaststunden subtrahiert. Die Wartungszeiten von den äquivalenten Volllaststunden abzuziehen ist eine Vereinfachung, die den schlechtesten Fall darstellt. Die Routinewartungen und Inspektion werden in der Regel auf Wetterbedingungen unter der Nennwindgeschwindigkeit gelegt. In Tabelle 15 werden die somit berechneten äquivalenten Volllaststunden für die Varianten angezeigt.

Tabelle 15: Äquivalente Volllaststunden der Varianten

Variante	Äquivalente Volllaststunden pro Jahr [h]
71	4484,38
72	4484,20
37	4474,92
32	4484,15
21	4476,61
25	4494,52

Die Variante mit den meisten äquivalenten Volllaststunden ist Variante 25 mit 4495 Stunden. Variante 71, 72 und 32 weisen ähnliche äquivalente Volllaststunden um 4484 Stunden auf. Mit

4477 äquivalenten Volllaststunden besitzt Variante 21 die zweit geringste Anzahl an äquivalenten Volllaststunden. Die geringste Anzahl an äquivalenten Volllaststunden liegt bei Variante 37 mit 4475 Stunden vor.

4.4 Kostenbetrachtung

In der Kostenbetrachtung werden die Kosten der Systeme und Strukturen zusammengetragen und mit dem Energieertrag der MRWEA verrechnet, um die Stromgestehungskosten der Varianten vergleichen zu können.

Die Struktur- und Anlagenkosten aus den Steckbriefen in Kapitel 4.1 und der Betrachtung in Kapitel 4.2 werden genutzt, um die Investitionskosten für die Varianten zu ermitteln. Diese Kosten werden durch Addition der Bestandteile der jeweiligen Varianten bestimmt. Für die Kosten der Gondel wird ein Wert von $895.000 \frac{\text{€}}{\text{MW}}$ festgelegt und für die Rotoren werden die Kosten von $435.000 \frac{\text{€}}{\text{MW}}$ angesetzt [114]. In Tabelle 114 des Anhangs befindet sich die zugehörige Berechnungstabelle und Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse.

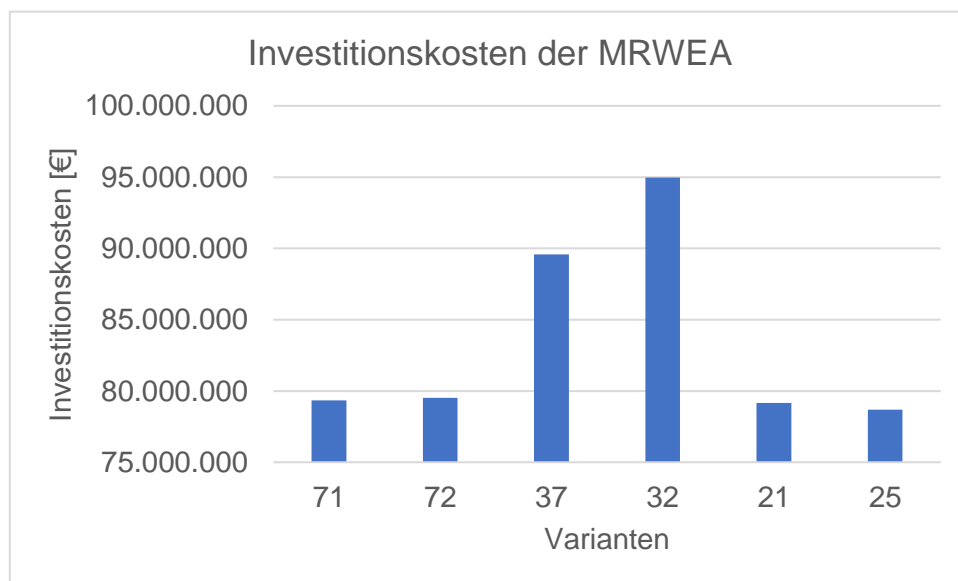


Abbildung 29: Investitionskosten der Varianten

Variante 71, 72, 21 und 25 weisen geringe Unterschiede in den Investitionskosten auf. Sie liegen zwischen 79,53 M€ bei Variante 72 und dem geringsten Wert der Variante 25 von 78,692 M€. Höhere Investitionskosten liegen bei Variante 37 und 32 vor. Variante 37 besitzt Investitionskosten von 89,568 M€. Der Maximalwert der Investitionskosten liegt bei Variante 32 mit 94,968 M€.

Für die weiter Kostenbetrachtung muss der Energieertrag der MRWEA über ihre Lebensdauer bestimmt werden. Die Lebensdauer wird auf 20 Jahre festgelegt. Multipliziert man die

Lebensdauer mit den äquivalenten Volllaststunden aus Kapitel 4.3 und der Nennleistung der MRWEA von 45 MW ergibt sich der Energieertrag der verschiedenen MRWEA-Varianten über 20 Jahre. Die Ergebnisse dieser Rechnung werden in Abbildung 30 dargestellt.

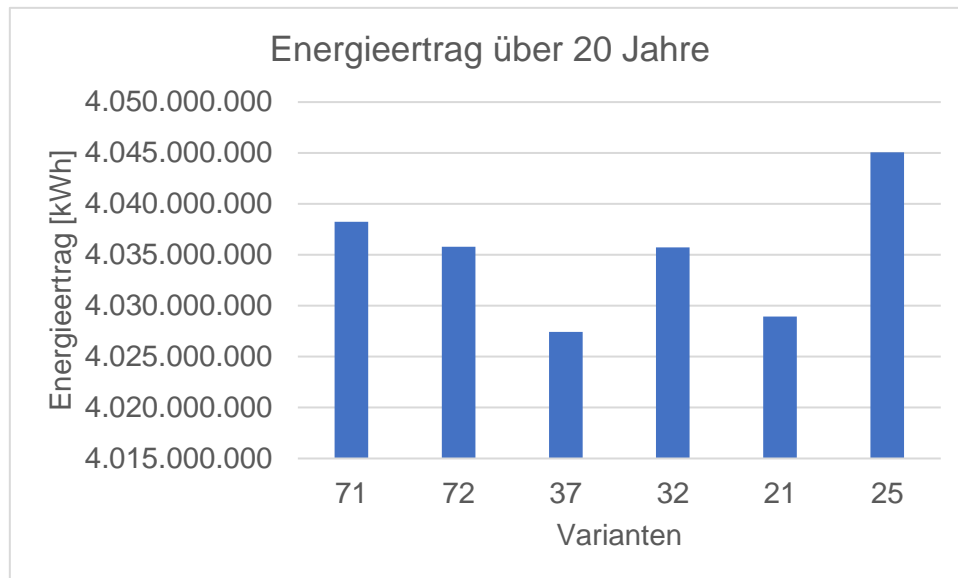


Abbildung 30: Energieertrag der Varianten über 20 Jahre

Der niedrigste Energieertrag wird mit 4.027 GWh bei Variante 37 prognostiziert gefolgt von Variante 21 mit 4.029 GWh. Variante 71, 72 und 32 erzielen Energieerträge um einen Wert von 4.037 GWh. 4.045 GWh ist der maximal erzielte Energieertrag bei der Variante 25.

Um die Gesamtanlagenkosten über 20 Jahre in dieser Betrachtung zu berechnen, werden neben den Investitionskosten auch die Installationskosten der Anlagen, die Operationskosten, die Charterkosten der Antransporte und die Lohnkosten für die Arbeitsstunden berücksichtigt. Die Entwicklungskosten, die Kosten der Schwimmplattform und die Entsorgungskosten der Anlage werden nicht betrachtet.

Die Installationskosten werden mit 30 % der Investitionskosten angenommen [114]. Für die festen Operationskosten werden Kosten von $70 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ angesetzt und die variablen Operationskosten werden als $0,008 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ definiert [115]. Zusammen mit der Nennleistung der MRWEA und den oberhalb ermittelten Energieertrag der Anlage werden die Operationskosten der Varianten über 20 Jahre bestimmt. Vier Arbeiter werden für den Arbeitseinsatz mit einem Gehalt von $40 \frac{\text{€}}{\text{h}}$ betrachtet. Werden diese beiden Werte mit den jährlichen Arbeitsstunden aus Kapitel 4.3 und der Lebensdauer von 20 Jahren multipliziert, ergeben sich die Lohnkosten der Varianten über die Lebensdauer der MRWEA. Die Charterkosten lassen sich aus den Kosten der Antransporte in den Steckbriefen aus Kapitel 4.1, multipliziert mit den jährlichen Einsätzen dieser aus Kapitel 4.3 und der Lebensdauer von 20 Jahren bestimmen. Aufaddiert ergeben

diese Kosten die Anlagenkosten der MRWEA-Varianten über 20 Jahre. In Abbildung 31 werden diese Anlagekosten aufgezeigt und die Rechnung befindet sich im Anhang in Tabelle 115.

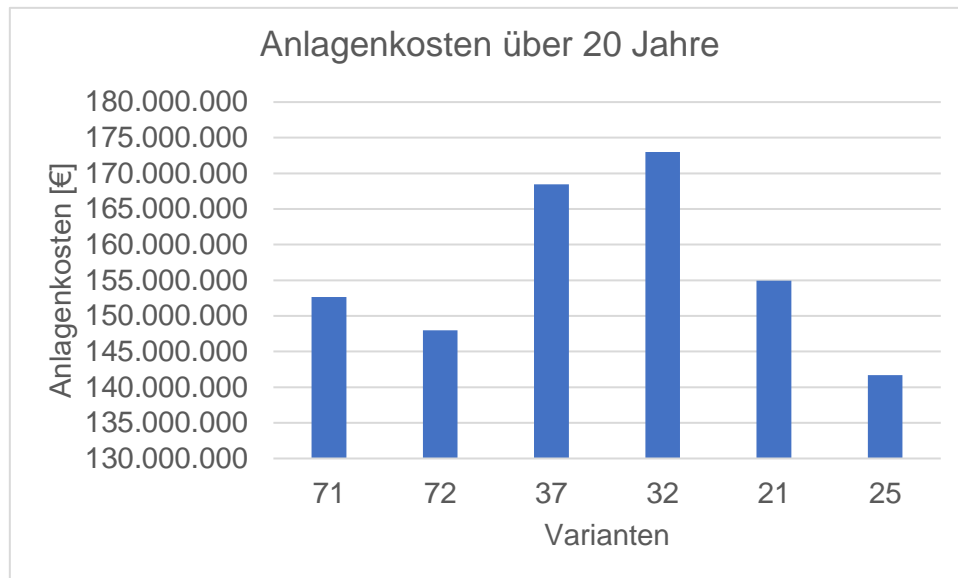


Abbildung 31: Anlagenkosten der Varianten über 20 Jahre

Variante 32 weist die höchsten Anlagenkosten mit 172,978 M€ auf. Die Anlagenkosten von Variante 37 folgen darauf mit 168,476 M€. Variante 25 besitzt mit 141,693 M€ die niedrigsten Anlagenkosten. Die zweit niedrigsten Anlagenkosten entstehen bei Variante 72 mit 147,967 M€. Variante 71 besitzt Anlagenkosten von 152,675 M€ und Variante 21 welche von 154,93 M€.

Dividiert man die Anlagenkosten der Varianten mit dem oberhalb bestimmten Energieertrag erhält man die Stromgestehungskosten in einer vereinfachten Form. Da die Kosten der Schwimmplattform nicht berücksichtigt werden und weitere Vereinfachungen getroffen wurden entspricht dieser Wert nicht den tatsächlichen Stromgestehungskosten der MRWEA. Er kann jedoch als Annäherung betrachtet werden und die Differenz der Stromgestehungskosten zwischen den Varianten kann zur Bewertung dieser genutzt werden. Abbildung 32 zeigt diese Stromgestehungskosten der auf 20 Jahre gerechneten MRWEA-Varianten ohne Schwimmplattform.

Das Verhältnis zwischen den Stromgestehungskosten der Varianten in Abbildung 32 verhält sich ähnlich zu den Verhältnis zwischen den Anlagenkosten der Varianten in Abbildung 31. Variante 32 weist mit $0,0429 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ die höchsten Stromgestehungskosten der Varianten auf. Die niedrigsten Stromgestehungskosten erzielt Variante 25 mit $0,035 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$. Variante 72 besitzt die zweit niedrigsten Stromgestehungskosten mit $0,0367 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ gefolgt von Variante 71 mit

0,0378 $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$. Die Stromgestehungskosten von Variante 21 liegen bei 0,0385 $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ und bei Variante 37 liegen sie bei 0,0418 $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$.

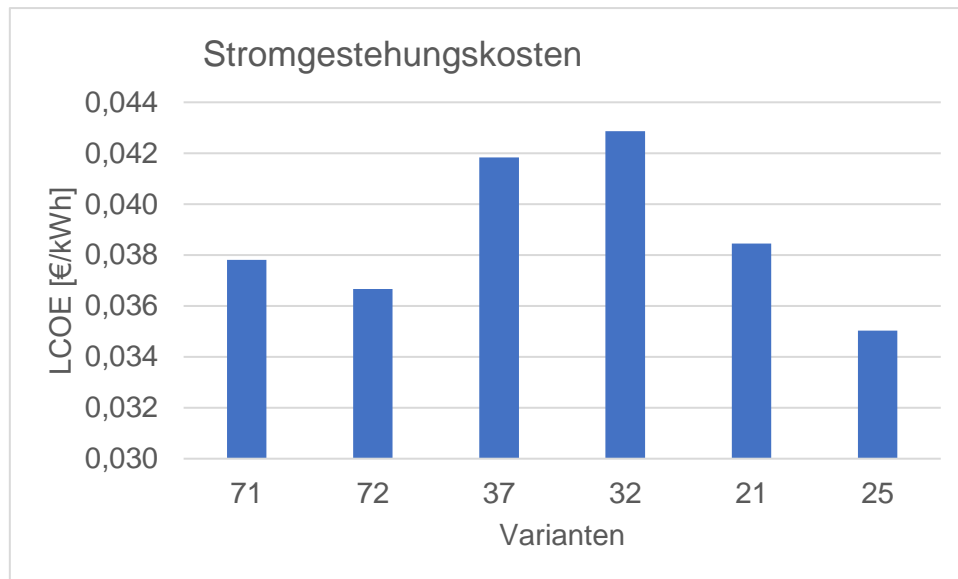


Abbildung 32: Vereinfachten Stromgestehungskosten der Varianten

5 Auswertung der Konzeptanalyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Betrachtungen in Kapitel 4 ausgewertet und der Vergleich zwischen den Varianten der Wartung an der MRWEA abgeschlossen.

5.1 Gewichts Betrachtung

Die Gewichts Betrachtung aus Kapitel 4.2 dient als Grundlage der folgenden Auswertung.

In Abbildung 20 wird gezeigt, dass die vertikale Anordnung der Tragestruktur ohne Querstreben das geringste Gewicht unter den untersuchten Tragestrukturanordnungen aufweist. Die vertikale Anordnung weist einen direkteren Kraftfluss von Kraftereinwirkungen der Rotoren durch die Struktur auf als die horizontale Anordnung. Hierdurch wird die Kraft durch eine geringere Strecke oder Anzahl an Stäben geleitet und somit muss ein geringerer Teil an Stäben für den jeweiligen Kraftereinfluss dimensioniert werden. Daher sind die Stäbe der vertikalen Anordnung im Durchschnitt geringer dimensioniert als die Stäbe der horizontalen Anordnung, falls die beiden Strukturen dieselbe Anzahl an Stäben aufweisen würden. Dies sorgt für ein geringeres Gewicht. Zudem weist die vertikale Anordnung ohne Querstreben mit 433 Stäben die geringste Anzahl an Stäben auf, womit das Gewicht geringer ausfällt. Die horizontale Anordnung besteht aus 473 Stäben und die vertikale Anordnung mit Querstreben besitzt 641 Stäbe. Das Gewicht der jeweiligen Anordnung fällt dementsprechend höher aus. Abbildung 21 stellt dar, dass die Kosten der Strukturen, wie aus Formel 19 zu entnehmen ist, direkt proportional zu der Masse der Strukturen ist. Hieraus ergibt sich, dass die vertikale Anordnung ohne Querstreben das geringste Gewicht und die geringsten Kosten unter den untersuchten Tragestrukturanordnungen aufweist. Somit stellt sie die geeignetste Anordnung für die MRWEA dar, wobei zu beachten ist, dass die Auslegung der Strukturen vereinfacht als Stäbe und ohne Torsionskräfte oder turbulente Kraftereinwirkung ausgeführt wurde.

Aufgrund der erhöhten Last der Laufstege auf die Tragestruktur, müssen die Stäbe in dieser größer dimensioniert werden und das Gewicht der Tragestruktur steigt um 82,7 t. Dies wird in Abbildung 22 gezeigt. Ebenso verhält es sich mit der zusätzlichen Belastung durch das Kransystem. Hierbei sorgt die größere Last für eine höhere Gewichtszunahme. Das Gewicht der Tragestruktur mit Laufstegen von 2,094 t ist das Grundgewicht der Tragestruktur für die MRWEA. Im Vergleich besitzt der Turm einer schwimmenden 15 MW ERWEA das Gewicht von 1.263 t [63]. Auf 45 MW hochgerechnet entspricht das einer Masse von 3.789 t. Die Tragestruktur der MRWEA besitzt somit ein signifikant geringeres Gewicht als die Turmstrukturen von mehreren vergleichbaren ERWEA, die in ihrer Gesamtzahl dieselbe Nennleistung erzielen.

Die Masse der Hilfsstrukturen in Abbildung 23 ist deutlich höher als das zusätzliche Gewicht der Tragestruktur aufgrund des Krans. Dies kommt daher, dass die Hilfsstrukturen in einem stark vereinfachten Aufbau im Vergleich zu der Tragestruktur vorliegen. Auf die Hilfsstruktur

wirken nur Druckkräfte, die eine Knicken verursachen können und somit eine höhere Auslegung der Stäbe benötigen. Zudem ist die Stablänge auf die gesamte Tragestrukturhöhe angelegt, was diesen Effekt verstärkt. Bei dem Einfluss des Krans auf die Tragestruktur wirken jedoch auch die Schubkräfte der Rotoren ein. Diese bewirken, dass auf viele der Stäbe an der Frontseite der Tragestrukturen Zugkräfte statt Druckkräfte wirken. Die meisten Stäbe der Hinterseite der Tragestruktur weisen hingegen Druckkräfte auf. In vielen Fällen wirkt die Last des Krans entgegen diesen Kräften, sodass die Zugkräfte an der Front und die Druckkräfte auf der Hinterseite gemindert werden. Durch diesen Zusammenhang ist die benötigte Neudimensionierung der Stäbe im Modell der Tragestruktur und die damit eingehende Gewichtserhöhung, gering im Vergleich zu den Hilfsstrukturgewichten. Das Gewicht der Greifarmstruktur ist geringer als die Struktur der Plattform, da sie weniger Stäbe benötigt und eine geringere Last anliegt. Die erhöhte Last beim Getriebewechsel sorgt für größere Auslegung der Stäbe. Somit wird beim Getriebewechsel eine größere Masse an Strukturen anfallen als beim Rotorblattwechsel. Mit einem Unterschied von bis zu 1.273 t zwischen den Hilfsstrukturen bei dem Rotorblattwechsel und dem Getriebewechsel und dementsprechend einer Differenz von 7,577 M€ wird davon ausgegangen, dass der integrierte Getriebewechsel mit Hilfsstrukturen nicht wirtschaftlich ist. Ein Einschleppen der Anlage in den Hafen für Reparaturen dieser Art sollte rentabler sein. Bei der Verwendung des integrierten Krans kann der Getriebewechsel in Betracht gezogen werden.

Der signifikante Unterschied der Masse der Varianten 32 und 37 zu dem Rest der Varianten in Abbildung 24 wird durch das deutlich erhöhte Gewicht der Hilfsstrukturen für den Großteiltransport im Vergleich zum Einfluss des Krans bewirkt, welches oberhalb beschrieben wird. Die restlichen Varianten weisen ein vergleichbares Gewicht auf, was zeigt, dass der Einfluss der festgelegten Anlagenbestandteile, wie Tragestruktur, Rotoren, Gondeln und Laufstege, größer ist als der Einfluss der variablen Anlagenteile der Wartungsvarianten. Diese festen Bestandteile machen im Falle der Varianten ohne Greifarm- oder Plattformgroßteiltransport circa 95 % des Gesamtgewichts aus. Die größten Einflüsse auf das Gewicht, die über die Varianten variable sind, sind das Gewicht der Hilfsstrukturen gefolgt von dem Gewicht der Lagerhalle. Der Einfluss der anderen Wartungssysteme auf das Gewicht ist insignifikant. Die Variante 25 weist das geringste Gewicht vor, da hier kein Aufzugssystem vorliegt, weshalb die Masse der Hilfsstruktur dafür nicht eingerechnet wird. Dies liegt daran, dass der Aufzug als unabhängig von der Tragestruktur betrachtet wird und für die Liftplattform keine Führung der Plattform vorgesehen wird, wie auch bei dem Kransystemen des Großteiltransports.

5.2 Zeitbetrachtung

Für diese Auswertung wird die Zeitbetrachtung aus Kapitel 4.3 als Grundlage verwendet.

Über den Verlauf von Abbildung 25 bis Abbildung 28 ist zu erkennen, dass der Antransport den größten Einfluss auf die Dauer der Wartungsaufgaben besitzt. Wartungssysteme, die keinen Antransport benötigen oder schnellere Antransporte, erzielen signifikant geringere Dauern der Wartungsarbeiten.

In Abbildung 25 ist zu sehen, dass die Varianten 71, 72 und 32 die geringste Inspektionsdauer mit und ohne Antransport aufweisen. Diese Varianten inspizieren die Anlage mit festen Kameras, weshalb kein Antransport nötig ist und auch an der Anlage keine Ausrüstung für die Wartung verfahren werden muss. Daher ist die Inspektionszeit geringer als bei den anderen Varianten. Variante 25 besitzt nur eine geringfügig höhere Inspektionszeit, da der Helikopter als schnellstes Transportmittel genutzt wird und die Inspektionsdrohne auch die schnellste Verfahrensgeschwindigkeit aufweist. Der nötige Transport von Personal an der Anlage in Variante 21 erhöht die Inspektionsdauer. Bei Variante 37 muss neben dem Personal auch der Wartungslift an der Anlage verfahren werden. In Kombination mit dem Antransport per SOV liegen die höchsten Inspektionsdauern vor.

Die Unterschiede der Wartungszeit mit Antransport zwischen den Varianten besteht daher, dass Variante 25 den Antransport mit dem Helikopter vollzieht und bei Variante 72 das CTV verwendet wird. In den restlichen Varianten wird ein SOV verwendet, wie in Abbildung 26 dargestellt wird. Ohne Antransport entsteht der Unterschied zwischen den Varianten weitestgehend durch die Geschwindigkeit des vertikalen Transport von Kleinteilen und Personal. Je langsamer der Vertikale Transport, desto höher die Wartungsdauer. Eine Ausnahme hierzu sind Variante 32 und 37. Variante 32 besitzt den langsamsten Vertikaltransport gefolgt von Variante 37. Trotzdem besitzt Variante 37 eine höher Wartungsdauer. Die erhöhte Wartungsdauer im Vergleich zu Variante 32 entsteht durch die Lagerung der Kleinteile an der Anlage, welche bei Variante 32 nicht vorliegt. Somit stellt die Lagerung der Kleinteile eine Verlangsamung der Arbeitsabläufe dar.

Abbildung 27 macht erneut die Unterschiede in den Antransportmitteln sichtbar. Die Variante 25 transportiert das Personal und die Kleinteile per Helikopter und erzielt somit die geringste Dauer der Rotorblattreparatur mit Antransport. Die anderen Varianten nutzen ein SOV und sind langsamer. Variante 72 nutzt ein SOV und kein CTV, da der Wartungslift als Großteiltransport angeliefert werden muss. Die Reparaturzeiten ohne Antransport sind von den vertikalen Transportgeschwindigkeiten an der Anlage und den zusätzlichen Zeiten bei den Wartungsoperationen abhängig. Variante 71 und 32 nutzen eine Wartungsdrohne, weshalb die vertikale Geschwindigkeit im Vergleich zu den anderen Varianten hoch ist und die Zusatzzeiten gering. Die Zeiten der eigentlichen Reparatur am Rotorblatt sind unter den Varianten vergleichbar. Somit erzielen Variante 71 und 32 die geringsten Reparaturzeiten

ohne Antransport. Die Varianten 21 und 25 nutzen Arbeiter im Gurtzeug, um die Reparatur durchzuführen. Im Vergleich hierzu nutzen Variante 72 und 37 den Wartungslift. Dieser Lift stellt zusätzliche Zeiten bei der Übergabe als Großteil dar und benötigt weitere Zeit, um verfahren und befestigt zu werden. Deshalb erzielen Variante 72 und 37 höhere Reparaturzeiten als die Varianten 21 und 25.

Für den Rotorblattwechsel mit Antransport in Abbildung 28 ist zu erkennen, dass wie bei den anderen Betrachtungen, die schnelleren Antransporte bessere Wartungszeiten erzielen. Zudem kann man in dieser Abbildung erkennen, dass Variante 72 und 25 deutlich geringere Antransportzeiten aufweisen als die anderen Varianten, obwohl sie im Großteiltransport dieselben oder ähnlich schnelle Systeme, wie die anderen Varianten verwenden. Die Zeitersparnis entsteht durch die Lagerung der Bauteile und die Möglichkeit bei einer Mehrheit der Rotorblattwechsel keinen Antransport für Großteile nutzen zu müssen. Variante 71 und 37 verfügen zwar über ein Lager, aber es kommt zu keiner Zeitersparnis, da für Großteiltransport und Personaltransport jeweils das SOV verwendet wird. Somit macht es keinen Unterschied im Antransport, ob die Großteile an der Anlage gelagert werden oder nicht. Dies kann man auch an der Differenz zwischen der Variante 71 mit und ohne Lager erkennen. Sie weisen keinen Unterschied bei der Antransportzeit auf. Für die Abläufe an der Anlage stellt die Lagerung zudem eine Erhöhung der Dauer dar. Die restlichen Zeitdifferenzen der Varianten ohne Antransport entstehen, wie oberhalb beschrieben, durch die Unterschiede in den vertikalen Transportsystemen.

Die Einsatzstunden an der Anlagen und die äquivalenten Volllaststunden der MRWEA korrelieren direkt mit den Zeiten der Wartungsaufgaben an der MRWEA für die verschiedenen Varianten. Somit bestehen für diese Zeiten dieselben Einflüsse, wie oberhalb für die Dauer der Wartungsarbeiten beschrieben.

5.3 Kostenbetrachtung

Folgende Analyse wird anhand der Ergebnisse in Kapitel 4.4 getätigt.

Die Investitionskosten der MRWEA ohne Schwimmplattform aus Abbildung 29 verhalten sich annähernd wie das Gesamtgewicht der Anlage, wie in Kapitel 5.1 beschrieben. Die festen Kosten der MRWEA überwiegen die variablen Kosten innerhalb der Varianten deutlich. Die signifikantesten variablen Einflüsse auf die Investitionskosten sind die bestehenden Hilfsstrukturen und die Lagerhalle. Somit sind Variante 37 und 32 die Varianten mit den höchsten Investitionskosten, da die die höchsten Kosten an Hilfsstrukturen vorweisen. Der Bereich der Investitionskosten liegt in einem realistischen Bereich und es liegen keine unerwartet hohen oder niedrigen Werte vor.

Da der Energieertrag in Abbildung 30 von der errechneten äquivalenten Volllaststundenzahl abhängt, ist er ebenfalls abhängig von den Wartungszeiten an der MRWEA. Somit besteht der Haupteinfluss in der Geschwindigkeit der Antransportsysteme und der vertikalen Transportanlagen an der MRWEA oder darin Systeme einzusetzen, die diese Transporte nicht benötigen.

Für die Anlagenkosten aus Abbildung 31 liegt eine Mischung der Einflüsse vor. Die Lohnkosten und die variablen Operationskosten sind von dem Einsatzstunden und dem Energieertrag abhängig. Diese Werte beruhen auf den Wartungszeiten an der MRWEA. Die Haupteinflüsse liegen daher in der Geschwindigkeit der Antransportsysteme und der vertikalen Transportanlagen. Die Investitionskosten besitzen hingegen die Haupteinflüsse von den Kosten der Hilfsstrukturen und der Lagerhalle. Die Charterkosten berechnen sich über die Kosten für den Antransport und somit die Art des Antransports. Die SOVs sind die langsamsten und teuersten Antransporte, während die schnelleren oder vergleichbar schnellen Varianten deutlich günstiger sind. Somit überlagert sich dieser Einfluss mit dem Einfluss der Antransportgeschwindigkeit auf die Wartungszeit. Hieraus ergibt sich eine signifikante Kostenhebung für die Varianten, die häufiger das SOV für den Transport nutzen, gegenüber der Nutzung der anderen Antransportmittel. Dies ist der Grund, dass Variante 25 im Vergleich zu den anderen Varianten die geringsten Anlagenkosten aufweist. Die Variante verwendet den schnellsten Antransport den Helikopter als häufigsten Antransport und kaum einen anderen Antransport. Variante 72, die eine Kombination aus CTV und SOV nutzt weist die zweit geringsten Anlagenkosten auf. Die anderen Varianten nutzen ausschließlich das SOV und weisen höhere Anlagenkosten auf. Die Varianten 32 besitzt zudem die Kombination des langsamsten vertikalen Kleinteil- und Personaltransport über die Liftplattform, die auch für den Großteiltransport genutzt wird, und der teuersten Hilfsstruktur für ebendiese. Deshalb bestehen bei Variante 32 die höchsten Anlagenkosten. Dieselben Werte sind bei Variante 37 die zweit ungünstigsten nach Variante 37, weshalb sie auch die zweithöchsten Anlagenkosten besitzt. Insgesamt liegen die Werte der Anlagenkosten in einem realistischen Bereich. Die

Differenz der Kosten über 20 Jahre von 31,29 M€ zwischen Variante 25 und Variante 37 zeigt, dass die Aufstellung verschiedener Wartungsvarianten sinnvoll ist und die Wartungssysteme einen signifikanten Einfluss auf die Anlagenkosten haben.

Die Werte der Stromgestehungskosten in Abbildung 32 sind unter der Berücksichtigung der fehlenden Kosten aus Kapitel 4.4 und den getroffenen Vereinfachung ein Wert, der das Potential von MRWEA zeigt. Selbst mit einer konservativen Verdoppelung der errechneten Stromgestehungskosten aufgrund der Simplifizierung der Berechnungen sind $7 \frac{\text{€cent}}{\text{kWh}}$ bis $8,6 \frac{\text{€cent}}{\text{kWh}}$ zumindest ein vergleichbarer Wert mit modernen ERWEA. Es bestehen dieselben Einflüsse wie bei den Anlagenkosten zusätzlich überlagert mit den Einflüssen des Energieertrags. Somit geht der Einfluss der Antransportgeschwindigkeit und Geschwindigkeit der vertikalen Transporte stärker in die Stromgestehungskosten ein als in die Anlagenkosten. Mit einer maximalen Differenz von $0,8 \frac{\text{€cent}}{\text{kWh}}$ zwischen den Varianten wird die oberhalb beschriebene Signifikanz der Wartungsanlagen auf die Anlage verdeutlicht.

Nutzt man den Unterschied in den errechneten Stromgestehungskosten als endgültige Bewertungsgrundlage der untersuchten Varianten ist Variante 25 die beste Variante und Variante 32 die schlechteste. Die zweite Platzierung erzielt Variante 72 gefolgt von Variante 71, Variante 21 und Variante 32 in absteigender Reihenfolge.

6 Zusammenfassung und Fazit

Die erstellten Modelle der Tragestrukturanordnung liefern valide Ergebnisse, sodass sie als bestätigt angesehen werden können. Somit können die Modelle für weitere Betrachtungen an der MRWEA genutzt werden und die Videos der Varianten sind ausreichend für Präsentationszwecke und Gesprächsanregungen auf Messen.

Die vertikale Tragestrukturanordnung ohne Querstreben erzielt ein geringeres Gewicht und geringere Kosten als die horizontale Tragestrukturanordnung oder die vertikale Anordnung mit Querstreben. Somit ist sie die bessere Tragestrukturanordnung in dieser Ausarbeitung. Mit einem Tragestrukturgewicht der vertikalen Anordnung von 2.094 t liegt ein realistischer Wert vor. Im Vergleich mit mehreren Türmen von schwimmenden ERWEAs, die zusammen dieselbe Nennleistung wie die MRWEA aufweisen, erzielt die Tragestruktur der MRWEA eine signifikant reduzierte Masse.

Eine zusätzliche Belastung der Tragestruktur durch einen verfahrbaren Kran führt zu deutlich geringeren Massezunahmen an der MRWEA als die zusätzlichen Hilfsstrukturen, welche für den Großteiltransport per Greifarm oder Liftplattform nötig sind.

Die erhöhte Belastung der Großteiltransporte bei einem Wechsel von Getriebeteilen gegenüber dem ausschließlichen Wechsel von Rotorblättern per integriertem System führt bei dem Großteiltransport über Greifarm und Liftplattform zu erheblichen Kostenanstiegen. Diese werden als unwirtschaftlich gegenüber dem Einschleppen der Schwimmplattform in einem Hafen eingeschätzt. Bei dem Großteiltransport über den Kran sind diese Differenzen geringer und ein Einsatz eines Systems für den Getriebewechsel kann in Betracht gezogen werden.

Haupteinfluss auf das Gesamtgewicht der Anlage sind feste Parameter an der Anlage, wie Tragestruktur, Rotoren, Gondeln und Laufstege. Bei den variablen Einflüssen der verschiedenen Varianten haben die benötigten Hilfsstrukturen und die Lagerhalle den größten Einfluss auf das Gewicht der MRWEA. Die Restlichen Wartungssysteme üben einen sehr geringen Einfluss auf das Anlagengewicht aus. Das Gesamtgewicht der MRWEA für die untersuchten Varianten liegt zwischen 5.490 t und 8.123 t.

In der in dieser Ausarbeitung angewendeten Methode zur Bestimmung der Wartungszeiten an der MRWEA wirkt die Geschwindigkeit des Antransports zu der Anlage den größten Einfluss auf diese Wartungszeiten. Betrachtet man nur die Wartungszeit an der MRWEA stellt die Geschwindigkeit der vertikalen Transportsysteme den größten Einflussfaktor dar. Daher erzielen Wartungssysteme, die keinen Antransport oder vertikalen Transport benötigen, bessere Wartungszeiten als die anderen Systeme.

Wird die Variante mit Lagerung ausgeführt, aber der Antransport nicht an die Lagerung angepasst, weisen die Varianten mit Lagerung erhöhte Wartungszeiten zu Varianten ohne Lagerung auf. Wird der Antransport jedoch ausgelegt, sodass wenn kein Bauteiltransport zur MRWEA nötig ist, ein schnelleres Antransportmittel genutzt wird als bei Einlagerung der

Bauteile, sind die Wartungszeiten durch die Lagerung signifikant verringert. Daher stellt die korrekt in die Variante integrierte Lagerung von Bauteilen einen Vorteil in der Wartung dar.

Die Investitionskosten der MRWEA liegen für die verschiedenen Varianten ohne Berücksichtigung der Schwimmplattform zwischen 78,69 M€ und 94,97 M€. Diese Werte sind in dem zu erwartenden Bereich. Wie bei dem Anlagengewicht sind die Kosten von fest verplanten Anlagenteilen höher als die Kosten der variablen Wartungssysteme. Die variablen Systeme mit den höchsten Kosten sind die nötigen Hilfsstrukturen und die Lagerhalle.

Beachtet man die Schwimmplattform, die Entwicklungskosten und die Entsorgungskosten der MRWEA nicht, besitzen die Varianten Gesamtkosten über 20 Jahre von 141,69 M€ bis 172,98 M€. Verrechnet mit dem Energieertrag über die Lebensdauer der MRWEA ergeben sich hieraus Stromgestehungskosten der Varianten zwischen $3,5 \frac{\text{€cent}}{\text{kWh}}$ und $4,3 \frac{\text{€cent}}{\text{kWh}}$. Hierbei erzielt Variante 25 die niedrigsten Stromgestehungskosten. Gibt man eine konservative Schätzung ab, um die Vereinfachungen in den Berechnungen auszugleichen, und verdoppelt die berechneten Stromgestehungskosten, weisen die Varianten Stromgestehungskosten vergleichbar mit offshore ERWEA auf. Die Differenz von $0,8 \frac{\text{€cent}}{\text{kWh}}$ zwischen den Stromgestehungskosten der Varianten zeigen den hohen Einfluss der Wartungssysteme auf die Stromgestehungskosten.

Diese Auswertung liefert gute Einsichten in die Wartungssysteme und Varianten an der MRWEA und erzielt verwertbare Ergebnisse. Die Bewertungen für die Variantenauswahl in Kapitel 3.4 weicht jedoch in einigen Punkten von den erzielten Ergebnissen ab. Zudem wurde nur ein Bruchteil der möglichen Variantenkombinationen untersucht. Somit ist sicher, dass Variante 25 zwar eine gute Variante ist, es aber definitiv eine bessere Variante gibt.

Weiterhin ist die Fahrt von Hafen zur MRWEA und zurück, ohne weitere Ziele auf der Fahrt, eine nicht ganz realistische Voraussetzung zur Ermittlung der Wartungszeiten. Hierdurch wird der Einfluss des Antransport stärker dargestellt als er im realistischen Fall sein sollte. Jedoch ist es sinnvoller mit der Planung an einer Einzelanlage zu beginnen, anstatt direkt einen ganzen Windpark zu planen. Dies gilt besonders, wenn es sich um ein nicht marktreifes Konzept wie einer MRWEA handelt und der Arbeitsaufwand würde zudem stark zunehmen.

Generell ist die Betrachtung der Kosten und Geschwindigkeiten an der MRWEA kritisch zu bewerten, da die für die Betrachtung genutzten Wartungssysteme aus Kapitel 4.1 nicht für die Verwendung an einer MRWEA geplant sind oder das TRL der Anlagen nicht den Anforderungen entspricht. Viele der Anbieter von Wartungsanlagen an WEA sind für erheblich höhere Rotordurchmesser und Gewicht ausgelegt und haben keine Produkte für die geringen Dimensionen von MRWEA Bauteilen im Angebot.

Die Varianten mit dem Großteiltransport mittels Greifarm und Liftplattform, liefern aufgrund ihrer Hilfsstrukturen, hohe Ergebnisse in Kosten und Gewicht ab. Zudem verfahren sie langsamer als ein Kransystem. Der Einsatz eines Krans über die Tragestrukturhöhe von 323 m

ist jedoch auch kritisch zu sehen. Über diese Distanz mit den Windverhältnissen auf dem Meer und den Schwankungen einer Schwimmplattform wird das Bauteil am Kranseil mit hoher Wahrscheinlichkeit mit der Tragestruktur oder anderen Bauteilen kollidieren. Der Kran bräuchte somit auch ein Art Führung der Bauteile, welche das Gewicht erhöhen wird und vermutlich auch die Verfahrensgeschwindigkeit mindert. Dies würde die Differenz zwischen dem Kran und dem Greifarm oder der Liftplattform reduzieren.

7 Ausblick

In einem iterativen Prozess könnte die Auswahl der Varianten mit den Ergebnissen dieser Arbeit verbessert werden, um eine geeignetere Auswahl an Varianten zu treffen. Somit könnten die bestmöglichen Varianten ermittelt werden. Alternativ kann ein, wie in Kapitel 3.4 erwähntes, numerisches Verfahren verwendet werden, um die Gesamtheit der Varianten zu analysieren. Hierbei müsste jedoch trotzdem die Einzelbewertung mit den Ergebnissen dieser Ausarbeitung überarbeitet werden.

Da die Hilfsstrukturen der Wartungssysteme einen großen Einfluss auf das Gewicht und die Kosten der MRWEA haben, könnte man sich damit beschäftigen diese Hilfsstrukturen, detaillierter auszulegen. Dies sollte das Gewicht und die Kosten der MRWEA senken. Zudem kann man ein Simulationsmodell erstellen, in dem die Hilfsstrukturen mit in die Tragestruktur eingebunden sind, wodurch sich das Gewicht weiter verringern könnte.

Für die Verwendung eines integrierten Kransystems an einer MRWEA mit dieser Größenordnung könnte man an dem Design einer Führung für die Bauteile an dem Kranseil entwickeln, um die Bauteilswankungen zu verringern. Es könnte sich um eine Kombination des Krans mit der Lösung einer Liftplattform handeln.

Die in den Modellen erstellten Abmessungen und Gewichte der MRWEA und ihrer Bauteile könnte genutzt werden, um in Zusammenarbeit mit Anbietern von Windenergie Wartungsanlagen an einem Projekt zu arbeiten, bei dem die Wartungsanlagen explizit für die MRWEA ausgelegt werden.

Mit den erstellten Modellen und den Anlagengewichten sind die Grundlagen gelegt, um eine Schwimmplattform für das Design der MRWEA auszulegen. Zusammen mit einer Schwimmplattform könnten die tatsächlichen Stromgestehungskosten der MRWEA abgeschätzt werden.

Aufbauend auf die einzelne MRWEA könnte man die Planung eines MRWEA-Windparks starten. Hierbei könnten Fahrwege und Wartungszeiten an den MRWEA optimiert werden. Zudem könnten die Abschattungseffekte zwischen den MRWEA betrachtet werden und berechnet werden, welche Nennleistung pro Fläche zu welchen Kosten erzielt werden könnte. Abschließend hierzu wäre der Vergleich mit einem ERWEA-Windpark.

IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammensetzung der LCOE eines offshore Windparks (2022) [1].....	1
Abbildung 2: Voraussichtliche operative Kostenminderung und Ausfallkosten über die Anlagennennleistung [9].....	2
Abbildung 3: Veranschaulichung des Square-Cube Law [13]	3
Abbildung 4: W2Power Projekt von EnerOcean (links) [19]; Liftkonzept von Wind Catching Systems (rechts) [20].....	5
Abbildung 5: Mögliche Anordnungen einer MRWEA mit Turm (oben) [24] und ohne Turm (unten) [26].....	7
Abbildung 6: Massevergleich der Tragstrukturen bei horizontaler und vertikaler Rotoranordnung [26]	8
Abbildung 7: Wartungslift innerhalb einer ERWEA (links) [30]; Rotorblattwartungslift (rechts) [33].....	10
Abbildung 8: Climbing Ring Robot Prototyp (links) [34]; Wartungskabine (rechts) [34]	11
Abbildung 9: Krankonzepte am Turm der WEA: Kletterkran (links) [37]; selbsterrichteter Kran (rechts) [38].....	12
Abbildung 10: Monohull CTV (links) [40]; Small Waterplane Area Twin Hull CTV (rechts) [40]	13
Abbildung 11: Aktiv bewegungskompensierte Gangway (links) [40]; SOV (rechts) [40]	15
Abbildung 12: Personaltransport in Abhängigkeit der Küstenentfernung [40].....	16
Abbildung 13: JUV (links) [51]; Kranschiff (rechts) [52].....	17
Abbildung 14: Zuggeschirr zur Montage eines Rotorblattes [48].....	18
Abbildung 15: Spaltweise (links), zeilenweise (mittig) und flächenweise Zuordnung (rechts) dezentraler Krankonzepte einer MRWEA [55]	21
Abbildung 16: Abrücken eines Rotors mit einer Ausgleichstraverse [55]	23
Abbildung 17: Geplante Tragestrukturanordnungen horizontal (links) und vertikal (rechts)...	50

Abbildung 18: Simulation der Stabkräfte in Femap [70]	52
Abbildung 19: Visualisierung der vertikalen Tragestruktur mit Querverstrebungen in Blender [77].....	54
Abbildung 20: Masse der Tragestrukturanordnungen	60
Abbildung 21: Kosten der Tragestrukturanordnungen	60
Abbildung 22: Masse der Tragestruktur mit verschiedenen Lasteinflüssen.....	62
Abbildung 23: Masse der Hilfsstrukturen der Großteiltransporte bei unterschiedlichen Lasten	63
Abbildung 24: Gesamtgewicht der ausgewählten Varianten	64
Abbildung 25: Dauer der Inspektion.....	66
Abbildung 26: Dauer der Kleinteil Wartung	66
Abbildung 27: Dauer der geringfügigen Rotorblattreparatur.....	67
Abbildung 28: Dauer des Rotorblattwechsels	68
Abbildung 29: Investitionskosten der Varianten	70
Abbildung 30: Energieertrag der Varianten über 20 Jahre	71
Abbildung 31: Anlagenkosten der Varianten über 20 Jahre	72
Abbildung 32: Vereinfachten Stromgestehungskosten der Varianten	73

V. Literaturverzeichnis

- [1] M. Jensen. "LCOE: Update of recent trends (Offshore)." Zugriff am: 4. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.nrel.gov/wind/assets/pdfs/engineering-wkshp2022-1-1-jensen.pdf>
- [2] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century e.V. "Renewables 2024 Global Status Report: Energy Supply." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_Supply.pdf
- [3] Global Wind Energy Council. "Global Offshore Wind Report 2024." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/GOWR-2024_digital_final_2.pdf
- [4] Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages, "Gestehungskosten von Strom im Vergleich," 2022, doi: 10.5281/zenodo.6326972.
- [5] C. Kost, S. Shammugam, V. Fluri, D. Peper, A. Memar und T. Schlegl. "Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies." Zugriff am: 4. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/cost-of-electricity.html>
- [6] T. Stehly, P. Duffy und H. Mulas. "2022 Cost of Wind Energy Review." Zugriff am: 4. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/88335.pdf>
- [7] M. Bilgili und H. Alphan, *Global Growth in Offshore Wind Turbine Technology*, 2022.
- [8] G. Constanzo und G. Brindley. "Wind Energy in Europe: 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/>
- [9] J. McMorland *et al.*, "A review of operations and maintenance modelling with considerations for novel wind turbine concepts," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 165, S. 112581, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112581.
- [10] W. Heronemus, "Method of Extracting Energy from Wind Turbines with a Plurality of Rotors," EP1483501, 03726010.6. [Online]. Verfügbar unter: <https://register.epo.org/application?number=EP03726010>
- [11] P. Jamieson *et al.* "Innovative Turbine Concepts – Multi-Rotor System." Deliverable 1.33. Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <http://www.innwind.eu/publications/deliverable-reports>
- [12] J. McMorland, A. Khisraw, P. Dalhoff, S. Störtenbecker und P. Jamieson, "Multi Rotor Wind Turbine Systems: An Exploration of Failure Rates and Failure Classification," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Jg. 2626, Nr. 1, S. 12027, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2626/1/012027.

- [13] B. Vern. "After a particle is entangled, you can only see the system." Zugriff am: 8. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://vernender.com/new/>
- [14] P. Dalhoff, "Aerodynamik der WEA,"
- [15] P. Dalhoff, "Skalierung und Innovative Konzepte der WEA,"
- [16] P. Jamieson und M. Branney, "Multi-Rotors; A Solution to 20 MW and Beyond?," *Energy Procedia*, Jg. 24, S. 52–59, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.06.086.
- [17] O. El Beshbichi, Y. Xing und M. C. Ong, "Dynamic analysis of two-rotor wind turbine on spar-type floating platform," *Ocean Engineering*, Jg. 236, S. 109441, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109441.
- [18] M. P. van der Laan *et al.*, "Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator," *Wind Energ. Sci.*, Jg. 4, Nr. 2, S. 251–271, 2019, doi: 10.5194/wes-4-251-2019.
- [19] enerocean S.L. "W2Power." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://enerocean.com/w2power/>
- [20] Wind Catching Systems AS. "Wind Catching with a different approach." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.windcatching.com/technology>
- [21] Myriad Wind Energy Systems. "The Myriad Turbine Proof of Concept." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.myriadwind.com/projects>
- [22] EnBW Energie Baden-Württemberg AG. "Floating wind turbine: Nezy2: The offshore technology of tomorrow." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.enbw.com/company/topics/wind-power/nezy2/>
- [23] P. Jamieson *et al.*, "Development of a multi rotor floating offshore system based on vertical axis wind turbines," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Jg. 2257, Nr. 1, S. 12002, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2257/1/012002.
- [24] S. Störtenbecker, P. Dalhoff, M. Tamang und R. Anselm, "Simplified support structure design for multi-rotor wind turbine systems," *Wind Energ. Sci.*, Jg. 5, Nr. 3, S. 1121–1128, 2020, doi: 10.5194/wes-5-1121-2020.
- [25] S. Störtenbecker, R. Anselm und P. Dalhoff, "Simplified approach for the optimal number of rotors and support structure design of a multi rotor wind turbine system," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Jg. 1618, Nr. 3, S. 32009, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1618/3/032009.
- [26] S. Störtenbecker, "Rectangular vs. hexagonal MRS structure design,"

- [27] BVG Associates. "Guide to a Floating Offshore Wind Farm: Operations and Maintenance." Zugriff am: 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://guidetofloatingoffshorewind.com/guide/operations-and-maintenance/>
- [28] Bundesverband WindEnergie. "Sicherer Betrieb durch Wartung und Instandhaltung." Zugriff am: 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/betrieb/wartung-und-instandhaltung/>
- [29] BGB Innovation. "Wind Turbine Maintenance: A complete Guide." Zugriff am: 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.bgbinnovation.com/knowledge/news-and-articles/wind-turbine-maintenance-guide>
- [30] K. Zipp. "Long overdue: A national standard for wind tower service lifts." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.windpowerengineering.com/long-overdue-a-national-standard-for-wind-tower-service-lifts/>
- [31] J. Battermann, "Systemische Betrachtung einer Multirotor Windenergieanlage unter Berücksichtigung von Wartungsaspekten," Masterprojekt, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg, 2022.
- [32] ReinforcedPlastics. "Meeting the Challenge of Wind Turbine Blade Repair." Zugriff am: 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://home.engineering.iastate.edu/~jdm/wesep594/HuiyiPaper1.pdf>
- [33] Gebr. Käufer GmbH. "Rotor Blade Access System." Zugriff am: 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.kaeuffer.de/wind-power-access-systems/?lang=en>
- [34] J. Franko, S. Du, S. Kallweit, E. Duelberg und H. Engemann, "Design of a Multi-Robot System for Wind Turbine Maintenance," *Energies*, Jg. 13, Nr. 10, S. 2552, 2020, doi: 10.3390/en13102552.
- [35] Lagerwey. "Climbing Crane – LCC140." Zugriff am: 1. September 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.lagerwey.com/climbing-crane/>
- [36] WindSpider. "WindSpider Crane." Zugriff am: 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://windspider.com/products/>
- [37] Mammoet. "Mammoet heralds new era for wind turbine assembly and maintenance." Zugriff am: 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.mammoet.com/news/mammoet-heralds-new-era-for-wind-turbine-assembly-and-maintenance/>
- [38] Aslan Berse. "Bei Wind und Wetter: Skandinavier bauen Kran, der Windrad-Problem löst." Zugriff am: 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: https://efahrer.chip.de/news/bei-wind-und-wetter-skandinavier-bauen-kran-der-windrad-problem-loest_1019043
- [39] G. van Bussel und C. Schöntag. "Operation and Maintenance Aspects of Large Offshore Windfarms." Zugriff am: 25. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.researchgate.net/profile/>

Gerard-Van-Bussel/publication/228742049_Operation_and_Maintenance_Aspects_of_Large_Offshore_Windfarms/links/0deec53bc130dd62a7000000/Operation-and-Maintenance-Aspects-of-Large-Offshore-Windfarms.pdf

- [40] B. Hu und C. Yung. "Offshore Wind Access Report 2020." Zugriff am: 25. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://resolver.tno.nl/uuid:d6cefbf6-2916-42fc-bb3d-b2d713938e09>
- [41] G. van Bussel und W. Bierbooms. "Analysis of different means of transport in the operation and maintenance strategy for the reference DOWEC offshore wind farm." [Online.] Verfügbar: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/owemes03_updated_paper.pdf
- [42] TGS 4C Offshore. "An Introduction to Crew Transfer Vessels." Zugriff am: 25. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.4coffshore.com/support/an-introduction-to-crew-transfer-vessels-aid2.html>
- [43] J. Wang, S. Zhang, J. Cheng, Y. Li, Y. Shen und Z. Wu, "Modeling and Simulation of a Turbine Access System with Three-Axial Active Motion Compensation," *JMSE*, Jg. 11, Nr. 12, S. 2237, 2023, doi: 10.3390/jmse11122237.
- [44] A. Dewan und M. Asgarpour. "Reference O&M Concepts for Near and Far Offshore Wind Farms." Zugriff am: 31. August 2024. [Online.] Verfügbar: <https://questfwe.com/wp-content/uploads/2018/06/ECN-OM-Study-002.pdf>
- [45] G. Katsouris und L. Savenije. "Offshore Wind Access 2017." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://publications.tno.nl/publication/34629371/3PLZ26/e16013.pdf>
- [46] E. Gaertner *et al.* "Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind." Zugriff am: 19. August 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>
- [47] Y. M. Welaya, A. Elhewy und M. Hegazy, "Investigation of jack-up leg extension for deep water operations," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Jg. 7, Nr. 2, S. 288–300, 2015, doi: 10.1515/ijnaoe-2015-0020.
- [48] Z. Jiang, "Installation of offshore wind turbines: A technical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 139, S. 110576, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110576.
- [49] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. "Gesamtaufnahme Nordsee." Zugriff am: 31. August 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Beobachtungssysteme/Gesamtaufnahme_Nordsee/gesamtaufnahme_nordsee_node.html
- [50] T. Aborgela, A. S. Shehata, M. A. Kotb und A. Radwan, "Heavy lift semi-submersible ships utilization in offshore wind turbines industry," *Energy Reports*, Jg. 8, S. 834–847, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.07.097.

- [51] Ulstein Groep ASA. "J102 Jack Up Vessel." Zugriff am: 1. September 2024. [Online.] Verfügbar: <https://ulstein.com/vessels/vessels/jack-up-vessel/j102>
- [52] Offshore Engineering. "Subsea 7's New Semi-Submersible Vessel." Zugriff am: 1. September 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.oedigital.com/news/506806-subsea-7-s-new-semi-submersible-vessel-equipped-for-xxl-offshore-wind-foundations-en-route-to-europe>
- [53] Y. Dalgic, I. Lazakis und O. Turan, "Vessel charter rate estimation for offshore wind O&M activities," in *Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*, C. Soares und F. Peña, Hg., CRC Press, 2013, S. 899–907.
- [54] D. Ahn, S. Shin, S. Kim, H. Kharoufi und H. Kim, "Comparative evaluation of different offshore wind turbine installation vessels for Korean west–south wind farm," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Jg. 9, Nr. 1, S. 45–54, 2017, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2016.07.004.
- [55] C. Matthies, "Aufbau und Instandhaltung von Multirotorwindenergieanlagen," Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg, 2020. [Online.] Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/20.500.12738/15370>
- [56] Ørjan Fredriksen. "WCS insights April 2024: The Windcatcher model test." Zugriff am: 3. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.windcatching.com/wcs-insights/insight5>
- [57] M. Schulz. "Ein Seilroboter, der mauert und Zwischendecken einzieht." [Online.] Verfügbar: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/bauprozess/ein-seilroboter-der-mauert-und-zwischendecken-einzieht/>
- [58] J. Rinker und K. Dykes. "WindPACT Reference Wind Turbines." Zugriff am: 1. September 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/67667.pdf>
- [59] AN Windenergie GmbH. "Technische Daten der AN Bonus 1MW/54." Zugriff am: 1. September 2024. [Online.] Verfügbar: https://media.mwps.world/static/2020/10/an-bonus-1000_54-technical-documentation.pdf
- [60] K. Remington. "Nordic Windpower's N1000 1-MW turbine." Zugriff am: 1. September 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.windpowerengineering.com/nordic-windpower%E2%80%99s-n1000-1-mw-turbine/>
- [61] Wind-Turbine-Models. "ELKRAFT Avedøre 1MW." Zugriff am: 1. September 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/1166-elkraft-aved-re-1mw>
- [62] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. "DGUV Information 203-007: Windenergieanlagen Handlungshilfe für die Gefährdungsbeurteilung im On und Offshorebereich." Zugriff am: 15. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/415>

- [63] C. Allen *et al.* "Definition of the UMaine VoltturnUS-S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15 Megawatt Offshore Reference Wind Turbine." Zugriff am: 15. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/76773.pdf>
- [64] B. Walter. "Stand- und Sitzsicherheit von Fahrgästen in Linienbussen." Zugriff am: 17. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://nordreko.de/downloads/veroeffentlichungen/181.pdf>
- [65] M. Witt, *Umfrage auf der WindEnergy Hamburg 2024*. Hamburg.
- [66] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. "DGUV Information 208-053: Mensch und Arbeitsplatz, Physische Belastung." [Online.] Verfügbar: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3499>
- [67] Jibflex. "Jibflex Portable Solution." Zugriff am: 15. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://jibflex.com/>
- [68] 3arm. "Manipulator M5." Zugriff am: 15. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://toolbalancerarms-3arm.com/de/manipulator/manipulatoren-m5/>
- [69] The MathWorks, *MATLAB* (2023). [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mathworks.com/>
- [70] Siemens Digital Industries Software, *Simcenter Femap* (2021).
- [71] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. "Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen." [Online.] Verfügbar: https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund_24042020_LF15.htm
- [72] Ø. Fredriksen und M. Collu, "E-Mails bezüglich der Bewegung zwischen Schwimmplattform und Schiff", Feb. 2020.
- [73] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. "Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Genehmigung der Anlage und des Betriebs von Hubschrauberflugplätzen." Zugriff am: 19. März 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund_19122005_LR116116413.htm
- [74] *DIN EN ISO 14122-4: Sicherheit von Maschinen - Ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen - Teil 4: Ortsfeste Steigleitern*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nam/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:242297548>
- [75] *DIN 18065: Gebäudetreppen - Begriffe, Messregeln, Hauptmaße*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:322316050>
- [76] Hailo Wind Systems. "TOPlift L Betriebsanleitung." Zugriff am: 21. März 2023. [Online.] Verfügbar: https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_ni/08b21aa5-186d-4a61-8114-

98606afc6f08/7.1.3%20%23%20a2%200104-3838.V00-Hailo-Betriebsanleitung-TOePlift-L--
edition--DE-EN.pdf

- [77] *Blender* (2024). [Online]. Verfügbar unter: <https://www.blender.org/>
- [78] Palfinger. "Palfinger Marine Product Catalogue." [Online.] Verfügbar: https://www.serimatik.com/wp-content/uploads/2019/06/PALFINGER-MARINE_Product-Brochure.pdf
- [79] verschiedene Firmen, *E-Mail Nachfrage zu Anlagenspezifikationen*.
- [80] O. Endrerud. "Helicopters for Offshore O&M." [Online.] Verfügbar: <https://www.nacleanenergy.com/wind/helicopters-for-offshore-o-m-1>
- [81] HandyBulk. "Ship Charter Rates." [Online.] Verfügbar: <https://www.handybulk.com/ship-charter-rates/>
- [82] Stauberstahl. "S355J2+N Eigenschaften." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.stauberstahl.com/werkstoffe/10570-werkstoff-datenblatt/>
- [83] Stahlshop. "S355 J2 Rundstahl." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: https://stahlshop.de/stahl-produkte/stabstahl/Stabstahl-S355_J2/Rundstahl_S355_J2/Rundstahl_S355_J2_10_mm
- [84] K60-Gitterrostsysteme. "Gitterroste." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.gitterrosten.de/Konfigurator-Gitterroste/Gitterrost-Konfigurator::1307.html>
- [85] Ram luffing cranes. [Online.] Verfügbar: <https://www.liebherr.com/de-de/maritime-krane/produkte/offshore-krane/ram-luffing-cranes-3803423>
- [86] NOV. "Lifting & Handling product portfolio." [Online.] Verfügbar: <https://www.nov.com/-/media/nov/files/products/rig/lifting-and-handling-product-portfolio.pdf>
- [87] Huisman. "pedestal mounted cranes." [Online.] Verfügbar: https://www.huismanequipment.com/en/products/cranes/pedestal_mounted_cranes#specs
- [88] Konecranes. "ESP. 5 Hafenmobilkrane." [Online.] Verfügbar: https://www.konecranes.com/de-de/hafenkrane-service/hafenmobilkrane/esp5-hafenmobilkrane?field_serving_zone_value=78
- [89] Kinocranes. "20 Ton Heavy Gantry Crane." [Online.] Verfügbar: <https://www.kinocranes.com/product/20-ton-heavy-gantry-crane/>
- [90] AiCrane. "Heavy Duty Gantry Crane." [Online.] Verfügbar: <https://aicraneliftingsolution.com/gantry-cranes/heavy-duty/>
- [91] OEG Renewables. "Furioso." [Online.] Verfügbar: <https://www.oegrenewables.com/hubfs/OEG%20Renewables%20Data%20Sheet%20-%20CTV%20Furioso.pdf>

- [92] Damen. "SOV 7017 Hybrid." [Online.] Verfügbar: <https://www.damen.com/vessels/offshore/service-operation-vessels/sov-7017-walk-to-work-vessel#specifications>
- [93] mbc. "Panamax Bulk Carrier Specifications." [Online.] Verfügbar: <https://www.marbrokers.com/ship-types/panamax>
- [94] Deutsche Helikopter. "AS 350 B3." [Online.] Verfügbar: https://www.deutsche-helikopter.de/home/helikoptertypen/as-350-b3_47.html
- [95] PTB Special Products. "30-Tonnen-Hubwagen." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.ptbspecial.com/de/nachrichten/item-30-tonnen-hubwagen-fa-14-r-den-transport-von-trafostationen>
- [96] Morello. "Heavy Duty Pallet Truck." [Online.] Verfügbar: <https://www.morellogiovanni.it/en/blog-news/heavy-duty-pallet-truck-capacity-20-ton/>
- [97] Palettenheber Display. [Online.] Verfügbar: https://www.pallit.com/products/10010131?_pos=3&_fid=9587bf656&_ss=c
- [98] CompanyDepot. "Transportwagen." [Online.] Verfügbar: <https://www.companydepot.de/transportwagen-tw-bis-max-tragkraft-250-kg.html>
- [99] heightec. "Wind Turbine Climber Kit Helix." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.heightec.com/product/wtg-wind-turbine-climber-kit-helix-international/>
- [100]Käufer Befahrtechnik. "K-BP-O." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.kaeuffer.de/produktblatt-k-bp-o/>
- [101]droneline.shop. "Matrice 300 RTK." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0246/7256/7348/files/dl_Infoblatt_m300.pdf?v=1610572131
- [102]droneline.shop. "ZENMUSE H20 Serie." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0246/7256/7348/files/dl_Infoblatt_h20-serie.pdf?v=1618931372
- [103]Reblade. "Flying Drone Repair of Wind Turbine Blades." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.icorr.org/wp-content/uploads/2023/07/6-Presentation-3-Flying-Drone-Repair-of-Wind-Turbine-Blades.pdf>
- [104]WindSpider. "WindSpider Products." [Online.] Verfügbar: <https://www.windspider.com/products>
- [105]Goracon. "G-Worklift." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://goracon.de/produkte/hoehenzugangstechnik/g-worklift/>
- [106]Enabl. "Blade Lifting Yokes." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://enabl-wind.com/products/all-equipment/blade-lifting-yokes-offshore/>

- [107]Avanti. "Der Avanti Octopus Lift." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://de.avanti-online.com/produkte/leitergeführte-service-lifts>
- [108]Goracon. "G-Servicelift." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://goracon.de/en/products/heigt-access-technology/g-servicelift-en/>
- [109]industrieklettershop.de. "PMX Motorwinde." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.industrieklettershop.de/actsafe-pmx-4s-motorwinde>
- [110]Hailo Wind Systems. "Ladder Systems." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.hailo-windsystems.com/en/ladder>
- [111]ADAC. "Wie schnell ist Schrittgeschwindigkeit." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.adac.de/verkehr/recht/verkehrsvorschriften-deutschland/schrittgeschwindigkeit/>
- [112]EnBW, *Q&A Meetings*, 2025
- [113]Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. "Rotorblätter vor Eis und Regen schützen." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.energieforschung.de/de/aktuelles/projekteinblicke/2020/rotorblaetter-vor-eis-und-regen-schuetzen>
- [114]The Crown Estate. "Wind farm cost." Zugriff am: 29. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://guidetofloatingoffshorewind.com/wind-farm-costs/>
- [115]P. Dalhoff, "Ermittlung der Stromgestehungskosten von Windparks."

VI. Anhang

Tabelle 16: Bewertungskriterien

Nummer	Bewertungskriterium
1	Gewicht
2	Kosten
3	Geschwindigkeit
4	Wartungswege
5	Erreichbarkeit
6	Ausfallrate
7	Wetteranfälligkeit
8	Verfügbarkeit
9	Lebensdauer
10	Sicherheit
11	Umsetzbarkeit
12	Anlagenschwerpunkt
13	Funktionsintegration

Tabelle 17: Gewichtungsmatrix Witt

Bewertungskriterium	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Anzahl	Gewichtung
1	x	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	5	6,41%
2	1	x	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	6	7,69%
3	1	1	x	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	6	7,69%
4	1	1	1	x	0	0	1	1	1	0	0	1	1	8	10,26%
5	1	1	1	1	x	1	1	1	1	0	1	1	1	11	14,10%
6	0	0	1	1	0	x	1	1	1	0	0	0	1	6	7,69%
7	0	0	0	0	0	0	x	1	1	0	0	0	1	3	3,85%
8	0	0	0	0	0	0	0	x	1	0	0	0	1	2	2,56%
9	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0,00%
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	x	1	1	1	12	15,38%
11	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	x	1	1	10	12,82%
12	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	x	1	8	10,26%
13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	x	1	1,28%
															100,00%

Tabelle 18: Gewichtungsmatrix Khisraw

Bewertungskriterium	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Anzahl	Gewichtung
1	x	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	3	3,85%
2	1	x	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	7	8,97%
3	1	0	x	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	7	8,97%
4	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3	3,85%
5	1	0	0	1	x	0	1	0	1	0	1	1	1	7	8,97%
6	1	1	1	1	1	x	1	0	1	0	1	1	1	10	12,82%
7	1	1	1	1	0	0	x	0	0	0	1	1	1	7	8,97%
8	1	1	1	1	1	1	1	x	1	0	1	1	1	11	14,10%
9	1	1	0	1	0	0	1	0	x	0	1	1	1	7	8,97%
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	x	1	1	1	12	15,38%
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0,00%
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	x	1	2	2,56%
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	x	2	2,56%
															100,00%

Tabelle 19: Varianten 1-8

Variante	1	2	3	4	5	6	7	8
Antransport Kleinteile	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV
Antransport Großteile	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV
Antransport Personal	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV
Übergabe Kleinteile	Kran	Kran	Kran	Kran	Gangway Personal	Gangway Personal	Gangway Personal	Gangway Personal
Übergabe Großteile	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran
Antransport Personal	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway
Bauteillagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung
Inspektion	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug
Kleinteiltransport (Vertikal)	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran
Kleinteiltransport (Horizontal)	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal
Großteiltransport	Z. Kran stationär	Z. Kran stationär	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran stationär	Z. Kran stationär	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran verfahrbar
Personaltransport (Vertikal)	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 20: Varianten 9-16

Variante	9	10	11	12	13	14	15	16
Antransport Kleinteile	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV
Antransport Großteile	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV
Antransport Personal	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV
Übergabe Kleinteile	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran
Übergabe Großteile	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran
Übergabe Personal	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway
Bauteillagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung
Inspektion	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug
Kleinteiltransport (Vertikal)	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran
Kleinteiltransport (Horizontal)	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal
Großteiltransport	D. Kran spaltweise	D. Kran spaltweise	D. Kran reihenweise	D. Kran reihenweise	D. Kran flächenweise	D. Kran flächenweise	Liftplattform Greifarm	Liftplattform Greifarm
Personaltransport (Vertikal)	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 21: Varianten 17-24

Variante	17	18	19	20	21	22	23	24
Antransport Kleinteile	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV	Lastschiff	Lastschiff
Antransport Großteile	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	Lastschiff	Lastschiff
Antransport Personal	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV	Helikopter	Helikopter
Übergabe Kleinteile	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Gangway Förderband	Kran
Übergabe Großteile	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Gangway Förderband	Kran
Antransport Personal	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Gangway	Kran Gondel
Bauteillagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Lagerung aller Teile	Lagerung aller Teile	Lagerung Großteile	Lagerung Großteile	Lagerung aller Teile	Lagerung aller Teile
Inspektion	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Installierte Kameras
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Personal Gurtzeug
Kleinteiltransport (Vertikal)	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Kran	Aufzug	Kran
Kleinteiltransport (Horizontal)	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Förderband	Schieneführung hängend
Großteiltransport	Greifarm schienengeführt	Greifarm schienengeführt	Z. Kran stationär	Z. Kran stationär	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran verfahrbar
Personaltransport (Vertikal)	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg Förderband	Laufsteg
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Treppe	Leiter
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 22: Varianten 25-32

Variante	25	26	27	28	29	30	31	32
Antransport Kleinteile	Helikopter	Lastschiff	Lastschiff	Helikopter	Lastschiff	Lastschiff	Helikopter	SOV
Antransport Großteile	Lastschiff	Lastschiff	Lastschiff	Lastschiff	Lastschiff	Lastschiff	Lastschiff	SOV
Antransport Personal	Helikopter	Helikopter	Helikopter	Helikopter	Helikopter	Helikopter	Helikopter	SOV
Übergabe Kleinteile	Gangway Hubwagen	Gangway Förderband	Kran	Gangway Hubwagen	Gangway Förderband	Kran	Gangway Hubwagen	Gangway Rollwagen
Übergabe Großteile	Gangway Hubwagen	Gangway Förderband	Kran	Gangway Hubwagen	Gangway Förderband	Kran	Gangway Hubwagen	Kran
Antransport Personal	Gangway	Gangway	Kran Gondel	Gangway	Gangway	Kran Gondel	Gangway	Gangway
Bauteillagerung	Lagerung Großteile	Lagerung aller Teile	Lagerung aller Teile	Lagerung Großteile	Lagerung aller Teile	Lagerung aller Teile	Lagerung Großteile	Keine Lagerung
Inspektion	Drohnen	Personal Wartungslift	Installierte Kameras	Drohnen	Personal Wartungslift	Installierte Kameras	Drohnen	Installierte Kameras
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Drohnen
Kleinteiltransport (Vertikal)	Liftplattform	Aufzug	Kran	Liftplattform	Aufzug	Kran	Liftplattform	Liftplattform
Kleinteiltransport (Horizontal)	Laufsteg Hubwagen	Laufsteg Förderband	Kran verfahrbar	Laufsteg Hubwagen	Laufsteg Förderband	Schieneführung hängend	Laufsteg Hubwagen	Laufsteg Rollwagen
Großteiltransport	Z. Kran verfahrbar	D. Kran reihenweis e	D. Kran reihenweis e	D. Kran reihenweis e	Liftplattform Greifarm	Liftplattform Greifarm	Liftplattform Greifarm	Liftplattform Greifarm
Personaltransport (Vertikal)	Liftplattform	Aufzug	Aufzug	Liftplattform	Aufzug	Aufzug	Liftplattform	Liftplattform
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg Förderband	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg Förderband	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg Rollwagen
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Leiter	Treppe	Leiter	Leiter	Treppe	Leiter	Leiter	Leiter
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 23: Varianten 33-40

Variante	33	34	35	36	37	38	39	40
Antransport Kleinteile	Helikopter	CTV	CTV	CTV	SOV	SOV	Helikopter	Helikopter
Antransport Großteile	CTV	SOV	SOV	SOV	SOV	SOV	Lastschiff	Lastschiff
Antransport Personal	Helikopter	CTV	CTV	CTV	SOV	SOV	Helikopter	Helikopter
Übergabe Kleinteile	Gangway Förderband	Kran	Kran	Aufzug	Gangway Hubwagen	Kran	Drohnen	Drohnen
Übergabe Großteile	Gangway Förderband	Kran	Kran	Kran	Gangway Hubwagen	Kran	Gangway Förderband	Gangway Hubwagen
Antransport Personal	Gangway	Kran Gurtzeug	Leiter	Aufzug	Gangway	Kran Gondel	Gangway	Gangway
Bauteillagerung	Lagerung Kleinteile	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Lagerung aller Teile	Lagerung aller Teile	Lagerung aller Teile	Lagerung aller Teile
Inspektion	Installierte Kameras	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Drohnen	Installierte Kameras
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Drohnen	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Drohnen	Wartungsroboter
Kleinteiltransport (Vertikal)	Liftplattform	Kran	Kran	Aufzug	Greifarm verfahrbar	Liftplattform	Drohnen	Drohnen
Kleinteiltransport (Horizontal)	Laufsteg Förderband	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Laufsteg Personal	Greifarm verfahrbar	Plattform verfahrbar	Drohnen	Drohnen
Großteiltransport	D. Kran flächenweise	Z. Kran stationär	Z. Kran stationär	Z. Kran stationär	Greifarm schienengeführt	Liftplattform Greifarm	Greifarm schienengeführt	Liftplattform Greifarm
Personaltransport (Vertikal)	Liftplattform	Leiter	Treppe	Aufzug	Aufzug	Liftplattform	Aufzug	Liftplattform
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg Förderband	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Plattform verfahrbar	Schienenwagen	Plattform verfahrbar
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Leiter	Leiter	Treppe	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter	Leiter
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 24: Varianten 41-48

Variante	41	42	43	44	45	46	47	48
Antransport Kleinteile	CTV	Helikopter	SOV	SOV	Lastschiff	Helikopter	Lastschiff	SOV
Antransport Großteile	SOV	CTV	CTV	SOV	CTV	CTV	Lastschiff	SOV
Antransport Personal	Helikopter	SOV	SOV	Lastschiff	CTV	SOV	SOV	Helikopter
Übergabe Kleinteile	Gangway Personal	Gangway Rollwagen	Gangway Personal	Gangway Personal	Kran	Gangway Hubwagen	Kran	Gangway Förderband
Übergabe Großteile	Gangway Förderband	Kran	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen	Kran	Gangway Förderband	Gangway Hubwagen	Kran
Antransport Personal	Gangway	Kran Gurtzeug	Gangway	Kran Gurtzeug	Gangway	Aufzug	Aufzug	Gangway
Bauteillagerung	Lagerung Kleinteile	Lagerung Kleinteile	Lagerung Großteile	Lagerung Kleinteile	Lagerung Kleinteile	Lagerung Kleinteile	Lagerung aller Teile	Lagerung Kleinteile
Inspektion	Personal Gurtzeug	Installierte Kameras	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Drohnen	Personal Gurtzeug
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Drohnen	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Drohnen	Personal Gurtzeug	Drohnen	Wartungsroboter
Kleinteiltransport (Vertikal)	Greifarm verfahrbar	Kran	Kran	Liftplattform	Liftplattform	Liftplattform	Greifarm verfahrbar	Liftplattform
Kleinteiltransport (Horizontal)	Schienenwagen	Laufsteg Förderband	Laufsteg Förderband	Schienenführung hängend	Laufsteg Förderband	Greifarm stationär	Plattform verfahrbar	Laufsteg Personal
Großteiltransport	Liftplattform Greifarm	Greifarm schienengeführt	D. Kran spaltweise	Liftplattform Greifarm	D. Kran reihenweise	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran stationär	Z. Kran verfahrbar
Personaltransport (Vertikal)	Treppe	Aufzug	Treppe	Treppe	Treppe	Liftplattform	Liftplattform	Leiter
Personaltransport (Horizontal)	Plattform verfahrbar	Plattform verfahrbar	Laufsteg Rollwagen	Plattform verfahrbar	Laufsteg Förderband	Schienenwagen	Schienenwagen	Laufsteg
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Treppe	Treppe	Treppe	Treppe	Leiter	Leiter	Leiter	Treppe
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 25: Varianten 49-56

Variante	49	50	51	52	53	54	55	56
Antransport Kleinteile	Helikopter	SOV	SOV	Lastschiff	Helikopter	CTV	CTV	CTV
Antransport Großteile	SOV	Lastschiff	SOV	CTV	CTV	CTV	CTV	Lastschiff
Antransport Personal	CTV	Helikopter	SOV	SOV	Helikopter	Helikopter	Helikopter	CTV
Übergabe Kleinteile	Gangway Rollwagen	Kran	Gangway Hubwagen	Kran	Aufzug	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen	Drohnen
Übergabe Großteile	Gangway Förderband	Kran	Kran	Gangway Förderband	Gangway Förderband	Kran	Kran	Gangway Hubwagen
Antransport Personal	Kran Gondel	Kran Gondel	Kran Gondel	Kran Gondel	Aufzug	Aufzug	Aufzug	Aufzug
Bauteillagerung	Lagerung Kleinteile	Lagerung Großteile	Keine Lagerung	Keine Lagerung	Lagerung Großteile	Lagerung Kleinteile	Lagerung Kleinteile	Lagerung aller Teile
Inspektion	Personal Gurtzeug	Drohnen	Personal Wartungslift	Drohnen	Drohnen	Drohnen	Personal Gurtzeug	Installierte Kameras
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Personal Gurtzeug
Kleinteiltransport (Vertikal)	Greifarm verfahrbar	Drohnen	Liftplattform	Drohnen	Greifarm verfahrbar	Drohnen	Drohnen	Drohnen
Kleinteiltransport (Horizontal)	Schienenwagen	Greifarm verfahrbar	Schienenführung hängend	Kran verfahrbar	Schienenführung hängend	Laufsteg Rollwagen	Schienenführung hängend	Laufsteg Hubwagen
Großteiltransport	Z. Kran stationär	Z. Kran stationär	Z. Kran stationär	D. Kran reihenweise	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran stationär	Liftplattform Greifarm	Greifarm schienengeführt
Personaltransport (Vertikal)	Liftplattform	Aufzug	Leiter	Liftplattform	Treppe	Leiter	Treppe	Leiter
Personaltransport (Horizontal)	Plattform verfahrbar	Laufsteg Förderband	Schienenwagen	Laufsteg Förderband	Plattform verfahrbar	Laufsteg Förderband	Laufsteg Förderband	Laufsteg Förderband
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Treppe	Leiter	Treppe	Treppe	Treppe	Treppe	Treppe	Treppe
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 26: Varianten 57-64

Variante	57	58	59	60	61	62	63	64
Antransport Kleinteile	Helikopter	CTV	SOV	Lastschiff	SOV	Lastschiff	SOV	CTV
Antransport Großteile	SOV	SOV	CTV	CTV	Lastschiff	Lastschiff	SOV	SOV
Antransport Personal	Helikopter	Helikopter	Helikopter	CTV	SOV	Helikopter	Helikopter	SOV
Übergabe Kleinteile	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen	Gangway Rollwagen	Gangway Personal	Gangway Personal	Gangway Förderband	Gangway Hubwagen	Gangway Rollwagen
Übergabe Großteile	Kran	Gangway Förderband	Kran	Kran	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen
Antransport Personal	Kran Gurtzeug	Kran Gurtzeug	Kran Gondel	Kran Gurtzeug	Kran Gurtzeug	Gangway	Gangway	Kran Gondel
Bauteillagerung	Lagerung Großteile	Keine Lagerung	Lagerung aller Teile	Lagerung Kleinteile	Lagerung Kleinteile	Lagerung Kleinteile	Keine Lagerung	Keine Lagerung
Inspektion	Personal Wartungslift	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Drohnen	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Personal Wartungslift	Wartungsroboter	Wartungsroboter	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Drohnen	Wartungsroboter	Personal Wartungslift
Kleinteiltransport (Vertikal)	Aufzug	Drohnen	Liftplattform	Liftplattform	Liftplattform	Aufzug	Drohnen	Aufzug
Kleinteiltransport (Horizontal)	Greifarm verfahrbar	Greifarm verfahrbar	Laufsteg Förderband	Greifarm verfahrbar	Schienenwagen	Laufsteg Personal	Schienenführung hängend	Laufsteg Rollwagen
Großteiltransport	D. Kran spaltweise	Z. Kran verfahrbar	D. Kran reihenweise	D. Kran flächenweise	D. Kran flächenweise	Z. Kran verfahrbar	D. Kran spaltweise	D. Kran flächenweise
Personaltransport (Vertikal)	Treppe	Leiter	Leiter	Liftplattform	Leiter	Liftplattform	Liftplattform	Liftplattform
Personaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg Förderband	Laufsteg	Plattform verfahrbar	Plattform verfahrbar	Laufsteg Förderband	Schienenwagen	Laufsteg
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Leiter	Treppe	Treppe	Treppe	Leiter	Leiter	Treppe	Treppe
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 27: Varianten 65-72

Variante	65	66	67	68	69	70	71	72
Antransport Kleinteile	Lastschiff	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV	CTV	SOV
Antransport Großteile	CTV	Lastschiff	Lastschiff	Lastschiff	SOV	SOV	SOV	SOV
Antransport Personal	CTV	SOV	Helikopter	SOV	SOV	Helikopter	CTV	SOV
Übergabe Kleinteile	Drohnen	Drohnen	Gangway Rollwagen	Kran	Drohnen	Gangway Rollwagen	Gangway Rollwagen	Gangway Rollwagen
Übergabe Großteile	Kran	Gangway Förderband	Gangway Förderband	Kran	Gangway Förderband	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen	Gangway Hubwagen
Antransport Personal	Gangway	Gangway	Leiter	Gangway	Gangway	Leiter	Gangway	Gangway
Bauteillagerung	Lagerung aller Teile	Lagerung Kleinteile	Lagerung Kleinteile	Lagerung Großteile	Keine Lagerung	Lagerung Kleinteile	Keine Lagerung	Keine Lagerung
Inspektion	Personal Wartungslift	Personal Gurtzeug	Drohnen	Installierte Kameras	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Installierte Kameras	Installierte Kameras
Wartung/ Geringfügige Reparatur	Wartungsroboter	Drohnen	Personal Gurtzeug	Personal Gurtzeug	Wartungsroboter	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift	Personal Wartungslift
Kleinteiltransport (Vertikal)	Greifarm verfahrbar	Greifarm verfahrbar	Liftplattform	Greifarm verfahrbar	Liftplattform	Greifarm verfahrbar	Aufzug	Aufzug
Kleinteiltransport (Horizontal)	Greifarm stationär	Laufsteg Rollwagen	Greifarm stationär	Plattform verfahrbar	Plattform verfahrbar	Drohnen	Schieneführung hängend	Laufsteg Rollwagen
Großteiltransport	D. Kran flächenweise	Z. Kran verfahrbar	D. Kran spaltweise	Z. Kran verfahrbar	Z. Kran stationär	Greifarm schienengeführt	Zentraler Kran stationär	Zentraler Kran verfahrbar
Personaltransport (Vertikal)	Leiter	Aufzug	Treppe	Liftplattform	Leiter	Treppe	Leiter	Aufzug
Personaltransport (Horizontal)	Plattform verfahrbar	Laufsteg Rollwagen	Laufsteg	Schienewagen	Laufsteg Rollwagen	Plattform verfahrbar	Laufsteg Rollwagen	Laufsteg Rollwagen
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	Treppe	Leiter	Leiter	Treppe	Treppe	Leiter	Leiter	Leiter
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg	Laufsteg

Tabelle 28: Einzelbewertung Antransport Großteile

Bewertungskriterium \ Ausführung	CTV	SOV	Lastschiff
Gewicht	X	X	X
Kosten	+	X	-
Geschwindigkeit	+	-	-
Wartungswege	X	X	X
Erreichbarkeit	-	+	+
Ausfallrate	X	X	X
Wetteranfälligkeit	-	+	+
Verfügbarkeit	+	X	-
Lebensdauer	X	X	X
Sicherheit	X	X	X
Umsetzbarkeit	X	X	X
Anlagenschwerpunkt	X	X	X

Tabelle 29: Einzelbewertung Antransport Personal

Bewertungskriterium \ Ausführung	CTV	SOV	Helikopter
Gewicht	X	X	X
Kosten	+	X	-
Geschwindigkeit	+	-	+
Wartungswege	X	X	X
Erreichbarkeit	-	+	-
Ausfallrate	X	X	X
Wetteranfälligkeit	-	+	X
Verfügbarkeit	+	-	+
Lebensdauer	X	X	X
Sicherheit	X	X	X
Umsetzbarkeit	X	X	X
Anlagenschwerpunkt	X	X	X

Tabelle 30: Einzelbewertung Übergabe Großteile

Bewertungskriterium \ Ausführung	Gangway Hubwagen	Gangway Förderband	Kran
Gewicht	+	+	-
Kosten	+	X	-
Geschwindigkeit	X	X	X
Wartungswege	X	X	X
Erreichbarkeit	X	X	X
Ausfallrate	+	X	-
Wetteranfälligkeit	-	-	+
Verfügbarkeit	+	-	+
Lebensdauer	+	-	X
Sicherheit	-	X	+
Umsetzbarkeit	+	-	+
Anlagenschwerpunkt	X	X	X

Tabelle 31. Einzelbewertung Übergabe Kleinteile

Bewertungskriterium \ Ausführung	Gangway Personal	Gangway Hubwagen	Gangway Rollwagen	Gangway Förderband	Kran	Drohnen	Aufzug
Gewicht	+	+	+	-	-	+	-
Kosten	+	X	X	X	-	+	+
Geschwindigkeit	X	+	+	+	+	-	-
Wartungswege	X	X	X	X	X	X	X
Erreichbarkeit	X	X	X	X	X	X	X
Ausfallrate	+	+	+	X	-	-	-
Wetteranfälligkeit	+	+	+	X	+	-	-
Verfügbarkeit	+	+	+	+	+	-	+
Lebensdauer	+	+	+	X	X	-	X
Sicherheit	-	X	X	X	+	+	X
Umsetzbarkeit	+	+	+	-	+	-	+
Anlagenschwerpunkt	X	X	X	X	X	X	X

Tabelle 32: Einzelbewertung Übergabe Personal

Bewertungskriterium \ Ausführung	Leiter	Aufzug	Gangway	Kran Gurtzeug	Kran Gondel
Gewicht	+	+	+	-	-
Kosten	+	+	X	X	-
Geschwindigkeit	-	-	+	-	+
Wartungswege	X	X	X	X	X
Erreichbarkeit	X	X	X	X	X
Ausfallrate	+	-	+	X	X
Wetteranfälligkeit	-	-	+	-	X
Verfügbarkeit	+	-	+	-	-
Lebensdauer	+	-	+	-	X
Sicherheit	-	-	+	-	+
Umsetzbarkeit	X	X	X	X	X
Anlagenschwerpunkt	X	X	X	X	X

Tabelle 33: Einzelbewertung Lagerung

Bewertungskriterium \ Ausführung	Lagerung Kleinteile	Lagerung Großteile	Lagerung aller Teile	Keine Lagerung
Gewicht	X	-	-	+
Kosten	X	-	-	+
Geschwindigkeit	X	X	X	X
Wartungswege	X	+	+	-
Erreichbarkeit	X	X	X	X
Ausfallrate	X	X	X	X
Wetteranfälligkeit	X	-	-	+
Verfügbarkeit	X	+	+	-
Lebensdauer	-	-	-	+
Sicherheit	X	X	X	X
Umsetzbarkeit	X	X	X	X
Anlagenschwerpunkt	X	+	+	-

Tabelle 34: Einzelbewertung Inspektion

Bewertungskriterium \ Ausführung	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Installierte Kameras	Drohnen
Gewicht	-	-	+	+
Kosten	+	+	-	X
Geschwindigkeit	-	-	+	+
Wartungswege	-	-	+	+
Erreichbarkeit	X	X	X	X
Ausfallrate	+	+	-	-
Wetteranfälligkeit	-	X	+	-
Verfügbarkeit	X	X	+	-
Lebensdauer	+	+	-	-
Sicherheit	-	-	+	+
Umsetzbarkeit	X	X	X	X
Anlagenschwerpunkt	X	X	X	X

Tabelle 35: Einzelbewertung Wartung / Geringfügige Reparatur

Bewertungskriterium \ Ausführung	Personal Gurtzeug	Personal Wartungslift	Drohnen	Wartungsroboter
Gewicht	+	+	+	-
Kosten	+	+	X	-
Geschwindigkeit	X	X	+	-
Wartungswege	-	-	+	-
Erreichbarkeit	X	X	+	-
Ausfallrate	+	+	-	-
Wetteranfälligkeit	-	X	-	+
Verfügbarkeit	+	+	-	-
Lebensdauer	+	+	-	-
Sicherheit	-	-	+	+
Umsetzbarkeit	+	+	-	-
Anlagenschwerpunkt	X	X	X	X

Tabelle 36: Einzelbewertung Kleinteiltransport Vertikal

Bewertungskriterium \ Ausführung	Aufzug	Kran	Greifarm verfahrbar	Drohnen	Liftplattform
Gewicht	x	+	x	+	-
Kosten	+	+	-	x	-
Geschwindigkeit	-	-	+	+	-
Wartungswege	x	x	x	+	-
Erreichbarkeit	x	x	x	x	x
Ausfallrate	+	+	-	x	-
Wetteranfälligkeit	+	-	+	-	+
Verfügbarkeit	+	+	-	-	-
Lebensdauer	+	+	x	-	+
Sicherheit	x	-	+	-	+
Umsetzbarkeit	+	+	-	x	-
Anlagenschwerpunkt	-	-	+	x	+

Tabelle 37: Einzelbewertung Kleinteiltransport Horizontal

Bewertungskriterium \ Ausführung	Laufsteg Personal	Laufsteg Förderband	Laufsteg Rollwagen	Laufsteg Hubwagen	Schienenwagen	Schienenführung hängend	Kran verfahrbar	Greifarm stationär	Greifarm verfahrbar	Plattform verfahrbar	Drohnen
Gewicht	+	-	x	x	x	+	+	-	x	-	+
Kosten	+	-	x	x	x	+	+	-	x	-	-
Geschwindigkeit	-	+	+	+	+	+	+	-	+	x	+
Wartungswege	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	+
Erreichbarkeit	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Ausfallrate	+	-	+	+	x	+	+	x	x	x	x
Wetteranfälligkeit	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Verfügbarkeit	+	x	+	+	x	+	+	-	-	x	-
Lebensdauer	+	-	+	+	+	+	+	x	x	x	-
Sicherheit	-	+	x	x	+	x	x	+	+	+	+
Umsetzbarkeit	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Anlagenschwerpunkt	x	-	x	x	-	x	x	-	x	+	x

Tabelle 38: Einzelbewertung Großteiltransport

Bewertungskriterium \ Ausführung	Zentraler Kran stationär	Zentraler Kran verfahrbar	Dezentrale Kräne spaltweise	Dezentrale Kräne reihenweise	Dezentrale Kräne flächenweise	Liftplattform Greifarm	Greifarm schienengefü hrt
Gewicht	+	+	-	-	-	+	+
Kosten	+	+	-	-	-	+	+
Geschwindigkeit	X	X	+	+	+	-	X
Wartungswege	+	+	+	+	+	-	-
Erreichbarkeit	+	+	-	+	-	-	X
Ausfallrate	+	+	-	-	-	X	X
Wetteranfälligkeit	+	+	-	-	-	+	+
Verfügbarkeit	-	-	+	+	+	-	-
Lebensdauer	+	-	+	-	-	-	-
Sicherheit	-	X	X	X	X	+	+
Umsetzbarkeit	+	+	+	+	+	-	-
Anlagenschwerpunkt	-	-	X	X	X	+	+

Tabelle 39: Einzelbewertung Personaltransport Vertikal

Bewertungskriterium \ Ausführung	Leiter	Aufzug	Treppe	Liftplattform
Gewicht	+	+	-	-
Kosten	+	+	+	-
Geschwindigkeit	-	+	-	+
Wartungswege	-	+	-	+
Erreichbarkeit	X	X	X	X
Ausfallrate	+	-	+	-
Wetteranfälligkeit	+	+	-	-
Verfügbarkeit	+	-	+	-
Lebensdauer	+	-	+	-
Sicherheit	-	+	-	+
Umsetzbarkeit	X	X	X	X
Anlagenschwerpunkt	-	-	-	+

Tabelle 40: Einzelbewertung Personaltransport Horizontal

Bewertungskriterium \ Ausführung	Laufsteg	Laufsteg Förderband	Laufsteg Rollwagen	Schienenwagen	Plattform verfahrbar
Gewicht	+	-	+	+	-
Kosten	+	-	+	+	-
Geschwindigkeit	-	+	+	+	X
Wartungswege	+	+	+	+	-
Erreichbarkeit	+	+	+	X	-
Ausfallrate	+	-	+	+	X
Wetteranfälligkeit	+	-	+	+	+
Verfügbarkeit	+	-	+	-	X
Lebensdauer	+	-	+	X	X
Sicherheit	+	-	-	+	+
Umsetzbarkeit	+	-	+	+	+
Anlagenschwerpunkt	X	-	X	-	+

Tabelle 41: Einzelbewertung Ersatzpersonaltransport Vertikal

Bewertungskriterium \ Ausführung	Leiter	Treppe
Gewicht	+	-
Kosten	+	-
Geschwindigkeit	X	X
Wartungswege	+	-
Erreichbarkeit	X	X
Ausfallrate	X	X
Wetteranfälligkeit	+	-
Verfügbarkeit	X	X
Lebensdauer	X	X
Sicherheit	X	X
Umsetzbarkeit	X	X
Anlagenschwerpunkt	+	-

Tabelle 42: Nummerierung der Prozesse

Prozess	Nr.
Antransport Kleinteile	1
Antransport Großteile	2
Antransport Personal	3
Übergabe Kleinteile	4
Übergabe Großteile	5
Übergabe Personal	6
Bauteillagerung	7
Inspektion	8
Wartung/ Geringfügige Reparatur	9
Kleinteiltransport (Vertikal)	10
Kleinteiltransport (Horizontal)	11
Großteiltransport	12
Personaltransport (Vertikal)	13
Personaltransport (Horizontal)	14
Ersatzpersonaltransport (Vertikal)	15
Ersatzpersonaltransport (Horizontal)	16

Tabelle 43: Gesamtbewertung Platzierung 1-8

Platzierung	1	2	3	4	5	6	7	8
Prozess \ Variante	71	72	37	32	21	25	7	19
1	0,2662	0,1806	0,2662	0,2662	0,2662	0,1757	0,2662	0,2662
2	0,2662	0,2662	0,2662	0,2662	0,2662	0,2106	0,2662	0,2662
3	0,2384	0,1806	0,2384	0,2384	0,2384	0,1479	0,2384	0,2384
4	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,4366	0,5532	0,4693	0,4366
5	0,3888	0,3888	0,3888	0,3672	0,3672	0,3888	0,3672	0,3672
6	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385
7	0,2255	0,2255	0,2255	0,1849	0,2255	0,2255	0,1849	0,2255
8	0,4457	0,4457	0,2496	0,4457	0,2267	0,3722	0,2267	0,2267
9	0,537	0,5288	0,5288	0,537	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059
10	0,5293	0,5293	0,4416	0,332	0,428	0,332	0,428	0,428
11	0,8307	0,7816	0,7313	0,7816	0,6844	0,7816	0,6844	0,6844
12	0,693	0,693	0,5579	0,4408	0,693	0,693	0,693	0,6569
13	0,4457	0,4457	0,4457	0,3932	0,4457	0,3932	0,4457	0,4457
14	0,8005	0,793	0,8005	0,793	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005
15	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314
Systemintegration	6,5	7,5	8,5	6	6,5	6,5	6	6,5
Bewertung	7,198	7,009	6,71	6,567	6,562	6,558	6,544	6,526

Tabelle 44: Gesamtbewertung Platzierung 9-16

Platzierung	9	10	11	12	13	14	15	16
Prozess \ Variante	3	5	24	1	28	22	8	11
1	0,2662	0,2662	0,2106	0,2662	0,1757	0,1806	0,1806	0,2662
2	0,2662	0,2662	0,2106	0,2662	0,2106	0,2662	0,2662	0,2662
3	0,2384	0,2384	0,1479	0,2384	0,1479	0,1806	0,1806	0,2384
4	0,4366	0,4693	0,4366	0,4366	0,5532	0,4366	0,4693	0,4366
5	0,3672	0,3672	0,3672	0,3672	0,3888	0,3672	0,3672	0,3672
6	0,5385	0,5385	0,3179	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385
7	0,1849	0,1849	0,2255	0,1849	0,2255	0,2255	0,1849	0,1849
8	0,2267	0,2267	0,4457	0,2267	0,3722	0,2267	0,2267	0,2267
9	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059
10	0,428	0,428	0,428	0,428	0,332	0,428	0,428	0,428
11	0,6844	0,6844	0,8307	0,6844	0,7816	0,6844	0,6844	0,6844
12	0,693	0,6569	0,693	0,6569	0,5825	0,693	0,693	0,5825
13	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457	0,3932	0,4457	0,4457	0,4457
14	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005
15	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314
Systemintegration	6	6	5,5	6	6,5	6,5	6	6
Bewertung	6,512	6,508	6,486	6,475	6,447	6,418	6,401	6,401

Tabelle 45: Gesamtbewertung Platzierung 17-24

Platzierung	17	18	19	20	21	22	23	24
Prozess \ Variante	20	17	27	4	6	2	31	9
1	0,1806	0,2662	0,2106	0,1806	0,1806	0,1806	0,1757	0,2662
2	0,2662	0,2662	0,2106	0,2662	0,2662	0,2662	0,2106	0,2662
3	0,1806	0,2384	0,1479	0,1806	0,1806	0,1806	0,1479	0,2384
4	0,4366	0,4366	0,4366	0,4366	0,4693	0,4366	0,5532	0,4366
5	0,3672	0,3672	0,3672	0,3672	0,3672	0,3672	0,3888	0,3672
6	0,5385	0,5385	0,3179	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385
7	0,2255	0,1849	0,2255	0,1849	0,1849	0,1849	0,2255	0,1849
8	0,2267	0,2267	0,4457	0,2267	0,2267	0,2267	0,3722	0,2267
9	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059
10	0,428	0,428	0,428	0,428	0,428	0,428	0,332	0,428
11	0,6844	0,6844	0,8307	0,6844	0,6844	0,6844	0,7816	0,6844
12	0,6569	0,5579	0,5825	0,693	0,6569	0,6569	0,4408	0,4584
13	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457	0,3932	0,4457
14	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005
15	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314
Systemintegration	6,5	6	5,5	6	6	6	7,5	6
Bewertung	6,382	6,376	6,375	6,368	6,365	6,332	6,325	6,277

Tabelle 46: Gesamtbewertung Platzierung 25-32

Platzierung	25	26	27	28	29	30	31	32
Prozess \ Variante	15	12	13	18	30	66	10	16
1	0,2662	0,1806	0,2662	0,1806	0,2106	0,2662	0,1806	0,1806
2	0,2662	0,2662	0,2662	0,2662	0,2106	0,2106	0,2662	0,2662
3	0,2384	0,1806	0,2384	0,1806	0,1479	0,2384	0,1806	0,1806
4	0,4366	0,4366	0,4366	0,4366	0,4366	0,2521	0,4366	0,4366
5	0,3672	0,3672	0,3672	0,3672	0,3672	0,1987	0,3672	0,3672
6	0,5385	0,5385	0,5385	0,5385	0,3179	0,5385	0,5385	0,5385
7	0,1849	0,1849	0,1849	0,1849	0,2255	0,1848	0,1849	0,1849
8	0,2267	0,2267	0,2267	0,2267	0,4457	0,2267	0,2267	0,2267
9	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,5059	0,537	0,5059	0,5059
10	0,428	0,428	0,428	0,428	0,428	0,4416	0,428	0,428
11	0,6844	0,6844	0,6844	0,6844	0,8307	0,7816	0,6844	0,6844
12	0,4408	0,5825	0,4176	0,5579	0,4408	0,693	0,4584	0,4408
13	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457	0,4457
14	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,8005	0,793	0,8005	0,8005
15	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314	0,314
Systemintegration	6	6	6	6	5,5	4	6	6
Bewertung	6,259	6,258	6,236	6,233	6,233	6,199	6,134	6,116

Tabelle 47: Gesamtbewertung Platzierung 33-40

Platzierung	33	34	35	36	37	38	39	40
Prozess \ Variante	14	68	39	51	64	36	47	62
1	0,1806	0,2662	0,1757	0,2662	0,1806	0,1806	0,2106	0,2106
2	0,2662	0,2106	0,2106	0,2662	0,2662	0,2662	0,2106	0,2106
3	0,1806	0,2384	0,1479	0,2384	0,2384	0,1806	0,2384	0,1479
4	0,4366	0,4366	0,2521	0,5532	0,5532	0,3	0,4366	0,3243
5	0,3672	0,3672	0,1987	0,3672	0,3888	0,3672	0,3888	0,3888
6	0,5385	0,5385	0,5385	0,3179	0,3179	0,0983	0,0983	0,5385
7	0,1849	0,2255	0,2255	0,1849	0,1849	0,1849	0,2255	0,1848
8	0,2267	0,4457	0,3722	0,2496	0,2496	0,2267	0,3722	0,2496
9	0,5059	0,5059	0,537	0,5059	0,5288	0,5059	0,537	0,537
10	0,428	0,4416	0,3612	0,332	0,5293	0,5293	0,4416	0,5293
11	0,6844	0,517	0,6979	0,8307	0,7816	0,6844	0,517	0,6844
12	0,4176	0,693	0,5579	0,6569	0,4176	0,6569	0,6569	0,693
13	0,4457	0,3932	0,4457	0,343	0,3932	0,4457	0,3932	0,3932
14	0,8005	0,7427	0,7427	0,7427	0,8005	0,8005	0,7427	0,3126
15	0,314	0	0,314	0	0	0,314	0,314	0,314
Systemintegration	6	2,5	7	3	3,5	7	2,5	4
Bewertung	6,093	6,07	5,912	5,912	5,898	5,876	5,831	5,796

Tabelle 48: Gesamtbewertung Platzierung 41-48

Platzierung	41	42	43	44	45	46	47	48
Prozess \ Variante	34	57	70	50	63	38	35	43
1	0,1806	0,1757	0,2662	0,2662	0,2662	0,2662	0,1806	0,2662
2	0,2662	0,2662	0,2662	0,2106	0,2662	0,2662	0,2662	0,1806
3	0,1806	0,1479	0,1479	0,1479	0,1479	0,2384	0,1806	0,2384
4	0,4366	0,5532	0,5532	0,4366	0,5532	0,4366	0,4366	0,4693
5	0,3672	0,3672	0,3888	0,3672	0,3888	0,3672	0,3672	0,3888
6	0,0791	0,0791	0,2972	0,3179	0,5385	0,3179	0,2972	0,5385
7	0,1849	0,2255	0,1848	0,2255	0,1849	0,2255	0,1849	0,2255
8	0,2267	0,2496	0,2496	0,3722	0,2496	0,2496	0,2267	0,2496
9	0,5059	0,5288	0,5288	0,5059	0,1996	0,5288	0,5059	0,5288
10	0,428	0,5293	0,4416	0,3612	0,3612	0,332	0,428	0,428
11	0,6844	0,7313	0,6979	0,7313	0,8307	0,517	0,6844	0,4551
12	0,6569	0,4584	0,5579	0,6569	0,4584	0,4408	0,6569	0,4584
13	0,343	0,2545	0,2545	0,4457	0,3932	0,3932	0,2545	0,2545
14	0,8005	0,8005	0,517	0,3126	0,7427	0,517	0,8005	0,793
15	0,314	0,314	0,314	0,314	0	0,314	0	0
Systemintegration	7	4	4,5	3	3	9,5	6	5,5
Bewertung	5,789	5,758	5,752	5,729	5,639	5,593	5,586	5,58

Tabelle 49: Gesamtbewertung Platzierung 49-56

Platzierung	49	50	51	52	53	54	55	56
Prozess \ Variante	61	48	40	49	46	23	41	52
1	0,2662	0,2662	0,1757	0,1757	0,1757	0,2106	0,1806	0,2106
2	0,2106	0,2662	0,2106	0,2662	0,1806	0,2106	0,2662	0,1806
3	0,2384	0,1479	0,1479	0,1806	0,2384	0,1479	0,1479	0,2384
4	0,4693	0,3243	0,2521	0,5532	0,5532	0,3243	0,4693	0,4366
5	0,3888	0,3672	0,3888	0,1987	0,1987	0,1987	0,1987	0,1987
6	0,0791	0,5385	0,5385	0,3179	0,0983	0,5385	0,5385	0,3179
7	0,1848	0,1848	0,2255	0,1848	0,1848	0,2255	0,1848	0,1849
8	0,3722	0,2267	0,4457	0,2267	0,2267	0,2496	0,2267	0,3722
9	0,5288	0,1996	0,1996	0,5059	0,5059	0,5288	0,537	0,5288
10	0,332	0,332	0,3612	0,4416	0,332	0,5293	0,4416	0,3612
11	0,7337	0,6844	0,6979	0,7337	0,3105	0,4551	0,7337	0,8307
12	0,4176	0,693	0,4408	0,6569	0,693	0,693	0,4408	0,5825
13	0,343	0,343	0,3932	0,3932	0,3932	0,4457	0,2545	0,3932
14	0,517	0,8005	0,517	0,517	0,7427	0,3126	0,517	0,3126
15	0,314	0	0,314	0	0,314	0	0	0
Systemintegration	3,5	4	6,5	3,5	3,5	7,5	3,5	2
Bewertung	5,463	5,451	5,434	5,419	5,215	5,214	5,205	5,187

Tabelle 50: Gesamtbewertung Platzierung 57-64

Platzierung	57	58	59	60	61	62	63	64
Prozess \ Variante	42	45	67	44	54	26	33	59
1	0,1757	0,2106	0,1806	0,2662	0,1806	0,2106	0,1757	0,2662
2	0,1806	0,1806	0,2106	0,2662	0,1806	0,2106	0,1806	0,1806
3	0,2384	0,1806	0,1479	0,2106	0,1479	0,1479	0,1479	0,1479
4	0,5532	0,4366	0,5532	0,4693	0,5532	0,3243	0,3243	0,5532
5	0,3672	0,3672	0,1987	0,3888	0,3672	0,1987	0,1987	0,3672
6	0,0791	0,5385	0,2972	0,0791	0,0983	0,5385	0,5385	0,3179
7	0,1848	0,1848	0,1848	0,1848	0,1848	0,2255	0,1848	0,2255
8	0,4457	0,2267	0,3722	0,2496	0,3722	0,2496	0,4457	0,2496
9	0,5059	0,537	0,5059	0,5288	0,5288	0,5288	0,537	0,1996
10	0,428	0,332	0,332	0,332	0,3612	0,5293	0,332	0,332
11	0,4551	0,4551	0,3105	0,8307	0,7816	0,4551	0,4551	0,4551
12	0,5579	0,5825	0,4584	0,4408	0,6569	0,5825	0,4176	0,5825
13	0,4457	0,2545	0,2545	0,2545	0,343	0,4457	0,3932	0,343
14	0,517	0,3126	0,8005	0,517	0,3126	0,3126	0,3126	0,8005
15	0	0,314	0,314	0	0	0	0,314	0
Systemintegration	1,5	2,5	2	6	2	7,5	6,5	2,5
Bewertung	5,163	5,161	5,159	5,134	5,107	5,104	5,083	5,069

Tabelle 51: Gesamtbewertung Platzierung 65-72

Platzierung	65	66	67	68	69	70	71	72
Prozess \ Variante	53	69	29	60	56	55	58	65
1	0,1757	0,1806	0,2106	0,2106	0,1806	0,1806	0,1806	0,2106
2	0,1806	0,2662	0,2106	0,1806	0,2106	0,1806	0,2662	0,1806
3	0,1479	0,2384	0,1479	0,1806	0,1806	0,1479	0,1479	0,1806
4	0,3	0,2521	0,3243	0,4693	0,2521	0,5532	0,5532	0,2521
5	0,1987	0,1987	0,1987	0,3672	0,3888	0,3672	0,1987	0,3672
6	0,0983	0,5385	0,5385	0,0791	0,0983	0,0983	0,0791	0,5385
7	0,2255	0,1849	0,2255	0,1848	0,2255	0,1848	0,1849	0,2255
8	0,3722	0,2496	0,2496	0,2496	0,4457	0,2267	0,2267	0,2496
9	0,5288	0,1996	0,5288	0,5288	0,5059	0,5288	0,1996	0,1996
10	0,4416	0,332	0,5293	0,332	0,3612	0,3612	0,3612	0,4416
11	0,8307	0,517	0,4551	0,7313	0,7816	0,8307	0,7313	0,3105
12	0,693	0,6569	0,4408	0,4176	0,5579	0,4408	0,693	0,4176
13	0,2545	0,343	0,4457	0,3932	0,343	0,2545	0,343	0,343
14	0,517	0,793	0,3126	0,517	0,3126	0,3126	0,3126	0,517
15	0	0	0	0	0	0	0	0
Systemintegration	3,5	3,5	7,5	5,5	3	2,5	1,5	1,5
Bewertung	5,032	5,018	4,962	4,947	4,902	4,716	4,507	4,463

Tabelle 52: Stabdicken der horizontalen Tragestrukturanordnung

Ebene	Ausrichtung	Mittlere Stabdicke [m]
0	Horizontal Binde	0,00
	Horizontal Hinten	0,00
	Horizontal Quer	0,00
	Horizontal Vorne	0,00
	Vertikal Quer	1,10
	Vertikal Quer Hinten	1,19
	Vertikal Quer Vorne	0,54
1	Horizontal Binde	0,37
	Horizontal Hinten	0,25
	Horizontal Quer	0,26
	Horizontal Vorne	0,37
	Vertikal Quer	1,01
	Vertikal Quer Hinten	1,03
	Vertikal Quer Vorne	0,36
2	Horizontal Binde	0,29
	Horizontal Hinten	0,27
	Horizontal Quer	0,24
	Horizontal Vorne	0,27
	Vertikal Quer	0,95
	Vertikal Quer Hinten	0,91
	Vertikal Quer Vorne	0,22
3	Horizontal Binde	0,29
	Horizontal Hinten	0,16
	Horizontal Quer	0,20
	Horizontal Vorne	0,23
	Vertikal Quer	0,89
	Vertikal Quer Hinten	0,76
	Vertikal Quer Vorne	0,50
4	Horizontal Binde	0,19
	Horizontal Hinten	0,16
	Horizontal Quer	0,18
	Horizontal Vorne	0,18
	Vertikal Quer	0,80
	Vertikal Quer Hinten	0,52
	Vertikal Quer Vorne	0,58

Ebene	Ausrichtung	Mittlere Stabdicke [m]
5	Horizontal Binde	0,16
	Horizontal Hinten	0,19
	Horizontal Quer	0,13
	Horizontal Vorne	0,16
	Vertikal Quer	0,68
	Vertikal Quer Hinten	0,22
	Vertikal Quer Vorne	0,60
6	Horizontal Binde	0,39
	Horizontal Hinten	0,19
	Horizontal Quer	0,11
	Horizontal Vorne	0,21

Tabelle 53: Stabdicken der vertikalen Tragestrukturanordnungen

Ebene	Ausrichtung	Mittlere Stabdicke [m]	Mittlere Stabdicke ohne Querstreben [m]
0	Binde	0,00	0,00
	Horizontal Hinten	0,00	0,00
	Horizontal Quer	0,00	-
	Horizontal Vorne	0,00	0,00
	Quer Hinten	0,90	0,88
	Quer Quer	0,52	-
	Quer Vorne	0,30	0,30
	Vertikal Kurz Hinten	0,91	1,22
	Vertikal Kurz Vorne	0,61	0,60
	Vertikal Lang Hinten	1,25	0,89
	Vertikal Lang Vorne	0,54	0,58
	Vertikal Quer Kurz	0,81	0,91
Vertikal Quer Lang	1,07	1,18	
1	Binde	0,33	0,44
	Quer Hinten	0,76	0,62
	Quer Quer	0,52	-
	Quer Vorne	0,27	0,29
	Vertikal Hinten	1,18	1,16
	Vertikal Quer	1,04	1,18
	Vertikal Vorne	0,46	0,52
2	Binde	0,28	0,39
	Quer Hinten	0,18	0,66
	Quer Quer	0,49	-
	Quer Vorne	0,72	0,16
	Vertikal Hinten	1,11	1,09
	Vertikal Quer	1,03	1,12
	Vertikal Vorne	0,37	0,42

Ebene	Ausrichtung	Mittlere Stabdicke [m]	Mittlere Stabdicke ohne Querstreben [m]
3	Binde	0,25	0,39
	Quer Hinten	0,65	0,48
	Quer Quer	0,47	-
	Quer Vorne	0,19	0,16
	Vertikal Hinten	1,04	1,03
	Vertikal Quer	0,99	1,12
	Vertikal Vorne	0,26	0,35
4	Binde	0,25	0,34
	Quer Hinten	0,58	0,42
	Quer Quer	0,44	-
	Quer Vorne	0,19	0,17
	Vertikal Hinten	0,96	0,93
	Vertikal Quer	0,97	1,04
	Vertikal Vorne	0,15	0,23
5	Binde	0,20	0,34
	Quer Hinten	0,51	0,23
	Quer Quer	0,42	-
	Quer Vorne	0,31	0,35
	Vertikal Hinten	0,88	0,85
	Vertikal Quer	0,91	1,04
	Vertikal Vorne	0,53	0,12
6	Binde	0,20	0,28
	Quer Hinten	0,42	0,25
	Quer Quer	0,40	-
	Quer Vorne	0,61	0,56
	Vertikal Hinten	0,78	0,74
	Vertikal Quer	0,89	0,94
	Vertikal Vorne	0,62	0,51
7	Binde	0,15	0,28
	Quer Hinten	0,36	0,11
	Quer Quer	0,37	-
	Quer Vorne	0,29	0,47
	Vertikal Hinten	0,68	0,63
	Vertikal Quer	0,82	0,94
	Vertikal Vorne	0,70	0,63

Ebene	Ausrichtung	Mittlere Stabdicke [m]	Mittlere Stabdicke ohne Querstreben [m]
8	Binde	0,14	0,20
	Quer Hinten	0,20	0,21
	Quer Quer	0,34	-
	Quer Vorne	0,40	0,40
	Vertikal Hinten	0,53	0,47
	Vertikal Quer	0,76	0,79
	Vertikal Vorne	0,66	0,62
9	Binde	0,09	0,20
	Quer Hinten	0,35	0,11
	Quer Quer	0,29	-
	Quer Vorne	0,28	0,41
	Vertikal Hinten	0,93	0,64
	Vertikal Quer	0,68	0,79
	Vertikal Vorne	0,67	0,65
10	Binde	0,58	0,01
	Quer Hinten	0,37	0,63
	Quer Quer	0,34	-
	Quer Vorne	0,42	0,39
	Vertikal Hinten	0,37	0,00
	Vertikal Quer	0,70	0,01
	Vertikal Vorne	0,61	0,00
11	Binde	0,70	0,00
	Horizontal Hinten	0,30	0,53
	Horizontal Vorne	0,17	0,08
	Horizontal Quer	0,65	-

Tabelle 54: Steckbrief zum Liebherr RL 900 Kran


Name	RL 900
Hersteller	Liebherr
Bild	
Gewicht [kg]	-
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	30.000
Reichweite [m]	bis zu 36
Max. Hebemoment [kNm]	-
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Hubgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit	Serviceintervall von 12 Monaten, Modularer Aufbau mit standardisierten Teilen
Wetteranfälligkeit	Offshore geeignet
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	Fernsteuerbar
TRL	9
Systemkompatibilität	Geeignetes Hubgewicht und Reichweite, Hubhöhe unbestätigt, Zubau der Schienenführung nötig
Quelle	[85]

Tabelle 55: Steckbrief zum NOV OC2809B Kran

Name	OC2809B
Hersteller	NOV
Bild	
Gewicht [kg]	55.000
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	30.000 (bei 20 m)
Reichweite [m]	4,5 - 35
Max. Hebemoment [kNm]	15.000
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Hubgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Offshore geeignet
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	-
TRL	9
Systemkompatibilität	Geeignetes Hubgewicht und Reichweite mit Teleskoparm, Hubhöhe unbestätigt, Zubau der Schienenführung nötig
Quelle	[86]

Tabelle 56: Steckbrief zum Huisman Mastkran

Name	Mastkran
Hersteller	Huisman
Bild	
Gewicht [kg]	-
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	-
Reichweite [m]	-
Max. Hebemoment [kNm]	-
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Hubgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Offshore geeignet
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	Aktive Bewegungskompensierung
TRL	9
Systemkompatibilität	Geeignetes Hubgewicht und Reichweite, Hubhöhe unbestätigt, Zubau der Schienenführung nötig
Quelle	[87]

Tabelle 57: Steckbrief zum Konecranes ESP. 5 Kran


Name	ESP.5
Hersteller	Konecranes
Bild	
Gewicht [kg]	355.000
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	100.000
Reichweite [m]	11,0 - 46,0
Max. Hebemoment [kNm]	-
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	80
Hubgeschwindigkeit [m/min]	120
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Für Hafendarbeiten ausgelegt
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	Hubgewicht und Reichweite etwas höher als gefordert, Hubhöhe unbestätigt
Quelle	[88]

Tabelle 58: Steckbrief zum Palfinger DKT 500 Kran

Name	DKT 500
Hersteller	Palfinger
Bild	
Gewicht [kg]	35.000
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	35.000
Reichweite [m]	bis zu 32
Max. Hebemoment [kNm]	5000
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Hubgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Offshore geeignet
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	Aktive Bewegungskompensierung, Fernsteuerbar
TRL	9
Systemkompatibilität	Geeignetes Hubgewicht und Reichweite mit Teleskoparm, Hubhöhe unbestätigt, Zubau der Schienenführung nötig
Quelle	[78]

Tabelle 59: Steckbrief zum Kinocranes Portalkran


Name	Heavy Gantry Crane
Hersteller	Kinocranes
Bild	
Gewicht [kg]	15.000 - 180.000
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	30.000 - 500.000
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Hubgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Für Outdoortätigkeiten ausgelegt
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	Schienengeführt, Positionstracking, Fernsteuerbar
TRL	9
Systemkompatibilität	Hubgewicht, Breite und Hubhöhe sind kompatibel
Quelle	[89]

Tabelle 60: Steckbrief zum Aicrane Portalkran


Name	Heavy Duty Gantry Crane
Hersteller	Aicrane
Bild	 A large red gantry crane is shown in an outdoor construction setting. The crane has two tall vertical legs and a horizontal beam with a hook. In the background, there is a large earthen embankment and a smaller green structure.
Gewicht [kg]	-
Kosten [€]	74.000 - 150.000
Max. Hubgewicht [kg]	30.000
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	80
Hubgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Für Outdoortätigkeiten ausgelegt
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	Hubgewicht, Breite und Hubhöhe sind kompatibel
Quelle	[90]

Tabella 61: Steckbrief zum OEG Renewables CTV


Name	Furioso (CTV)
Hersteller	OEG Renewables
Bild	
Charterkosten [€/Tag]	10.500
Verfahrgeschwindigkeit [km/h]	46,3
Signifikante Wellenhöhe [m]	2 - 2,5
TRL	9
Systemkompatibilität	Zusätzliche Anlegestruktur nötig
Quelle	[91]

Tabella 62: Steckbrief zum Damen Shipyards SOV


Name	SOV 7017 Hybrid
Hersteller	Damen Shipyards Group
Bild	
Charterkosten [€/Tag]	62.000
Verfahrgeschwindigkeit [km/h]	22,2
Signifikante Wellenhöhe [m]	bis 4,5
TRL	9
Systemkompatibilität	Anlegepunkt nutzbar
Quelle	[92]

Tabelle 63: Steckbrief zum Panamax Sized Cargo Vessel


Name	Panamax Sized Cargo Vessel
Hersteller	-
Bild	
Charterkosten [€/Tag]	15.000
Verfahrensgeschwindigkeit [km/h]	25,9
Signifikante Wellenhöhe [m]	bis 5
TRL	9
Systemkompatibilität	Anlegepunkt nutzbar
Quelle	[93]

Tabelle 64: Steckbrief zum Airbus AS 350 B3 Helikopter


Name	AS 350 B3 (Helikopter)
Hersteller	Airbus Helicopters
Bild	
Charterkosten [€/Tag]	14.000
Verfahrensgeschwindigkeit [km/h]	210
Signifikante Wellenhöhe [m]	bis 6
TRL	9
Systemkompatibilität	Zusätzliche Landstruktur nötig
Quelle	[94]

Tabelle 65: Steckbrief zum PTB Special Products Hubwagen


Name	Schwerlast Hubwagen
Hersteller	PTB Special Products
Bild	
Gewicht [kg]	(20.000)
Kosten [€]	150.000
Max. Hubgewicht [kg]	30.000
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	50 - 100
Verfügbarkeit	Wartungsfreie Motoren
Wetteranfälligkeit	Für Hafeneinsätze ausgelegt
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	-
TRL	9
Systemkompatibilität	Breite und Hubhöhe sind geeignet
Quelle	[95]

Tabelle 66: Steckbrief zum Morello Giovanni Hubwagen


Name	SGAE-E VS – Transpallet
Hersteller	Morello Giovanni
Bild	
Gewicht [kg]	-
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	20.000 - 70.000
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	30
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	Fernsteuerbar
TRL	9
Systemkompatibilität	Breite und Hubhöhe sind geeignet
Quelle	[96]

Tabelle 67: Steckbrief zum Pallit Palettenheber


Name	Display-Palettenheber
Hersteller	Pallit
Bild	
Gewicht [kg]	21
Kosten [€]	236,81
Max. Hubgewicht [kg]	200
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	Personalabhängig
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	5 (Garantie)
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passende Maße und Hubgewicht
Quelle	[97]

Tabelle 68: Steckbrief zum HanseLifter Transportwagen


Name	Transportwagen TW1-150
Hersteller	HanseLifter
Bild	
Gewicht [kg]	12,5
Kosten [€]	87
Max. Hubgewicht [kg]	150
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	Personalabhängig
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passende Maße und Hubgewicht
Quelle	[98]

Tabelle 69: Steckbrief zum heightec Climber Kit


Name	WTG Wind Turbine Climber Kit HELIX
Hersteller	heightec
Bild	
Gewicht [kg]	7,2
Kosten [€]	983,85
Max. Hubgewicht [kg]	140
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	9
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	10
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[99]

Tabelle 70: Steckbrief zur Käufer Windkraftbefahranlage

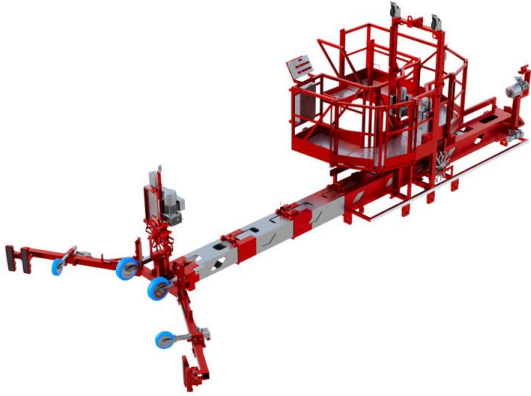
Name	Windkraftbefahranlage K-BP-O
Hersteller	Käufer
Bild	
Gewicht [kg]	1300
Kosten [€]	300.000, 6.000 / Woche (Mietpreis)
Max. Hubgewicht [kg]	360
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	9
Wetteranfälligkeit	Offshore geeignet
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	Für Rotorblätter mit breiteren Maßen und höherem Turmabstand ausgelegt
Quelle	[100]

Tabelle 71: Steckbrief zur DJI Drohne

Name	MATRICE 300 RTK
Hersteller	DJI
Bild	
Gewicht [kg]	6,3
Kosten [€]	20.000
Max. Hubgewicht [kg]	2,7
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	1.300
Wetteranfälligkeit	Einsetzbar bei Windgeschwindigkeiten bis 15 m/s
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[101]

Tabelle 72: Steckbrief zur DJI Kamera

Name	Zenmuse H20
Hersteller	DJI
Bild	
Gewicht [kg]	(0,4)
Kosten [€]	4.500 x 45
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[102]

Tabelle 73: Steckbrief zur Reblade Wartungsdrohne


Name	Wind Turbine Blade Repair Drone
Hersteller	Reblade
Bild	
Gewicht [kg]	< 25
Kosten [€]	-
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	(700) / 5
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Offshore geeignet
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	Fernsteuerbar
TRL	9
Systemkompatibilität	Für breitere Rotorblätter ausgelegt
Quelle	[103]

Tabelle 74: Steckbrief zum WindSpider Blade Tool

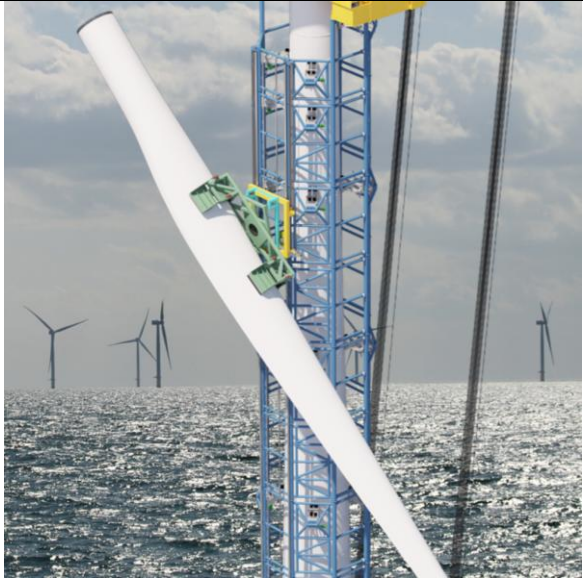
Name	WindSpider Blade Tool
Hersteller	WindSpider
Bild	
Gewicht [kg]	-
Kosten [€]	(850.000)
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	(12)
Hubgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	-
TRL	4 - 5
Systemkompatibilität	Zu große Dimensionen
Quelle	[104]

Tabelle 75: Steckbrief zum 3arm Manipulator


Name	Manipulator M5
Hersteller	3arm
Bild	
Gewicht [kg]	48
Kosten [€]	(12.000)
Max. Hubgewicht [kg]	50
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	16
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	-
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[68]

Tabelle 76: Steckbrief zur Wind Catching Systems Wartungsplattform


Name	Maintenance Elevator Platform
Hersteller	Wind Catching Systems
Bild	
Gewicht [kg]	30.000 - 45.000 (Plattform)
Kosten [€]	833.000 - 1.250.000 (Plattform)
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	15 - 22 (Unbeladen)
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	10 -15 (Beladen)
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Offshore geeignet
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	Geführte Bauteilbewegung, Ausreichender Abstand von Arbeitern zu bewegten Bauteilen
TRL	4 - 5
Systemkompatibilität	Zusätzliche Tragestruktur nötig, Mindert Problem der Strukturschwankungen während des Transports
Quelle	[20]

Tabelle 77: Steckbrief zum Goracon Arbeitslift


Name	G-trac 500 mit C-Bügel
Hersteller	Goracon
Bild	
Gewicht [kg]	455
Kosten [€]	(18.000)
Max. Hubgewicht [kg]	520
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	16
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[105]

Tabelle 78: Steckbrief zum Enabl C-Yoke


Name	C-Yoke
Hersteller	ENABL
Bild	
Gewicht [kg]	-
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	-
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	-
TRL	9
Systemkompatibilität	Zu Große Dimensionen
Quelle	[106]

Tabelle 79: Steckbrief zum Avanti Servicelift


Name	Octopus XL
Hersteller	Avanti
Bild	
Gewicht [kg]	270
Kosten [€]	15.000 - 20.000
Max. Hubgewicht [kg]	350
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	18
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Geschlossene Kabine
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[107]

Tabelle 80: Steckbrief zum Goracon Servicelift


Name	GWB-400
Hersteller	Goracon
Bild	
Gewicht [kg]	220
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	400
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	18
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	Geschlossene Kabine
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[108]

Tabelle 81: Steckbrief zur ActSafe Seilwinde


Name	PMX Motorwinde
Hersteller	ACTSAFE
Bild	
Gewicht [kg]	20
Kosten [€]	8818,5
Max. Hubgewicht [kg]	250
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	17
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[109]

Tabelle 82: Steckbrief zum Hailo Wind Systems Leitersystem


Name	Ladder System
Hersteller	Hailo Wind Systems
Bild	
Gewicht [kg]	-
Kosten [€]	-
Max. Hubgewicht [kg]	-
Verfahrensgeschwindigkeit [m/min]	-
Verfügbarkeit [%]	-
Wetteranfälligkeit	-
Lebensdauer [a]	-
Sicherheit	gegeben
TRL	9
Systemkompatibilität	passig
Quelle	[110]

Tabelle 83: Berechnung des Gewichts der horizontalen Tragestruktur

Ebene	Ausrichtung	Mittlere Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0	Horizontal Binde	1,00	0,026	41,20515	6	6,42	50.385,64	299.794,54
	Horizontal Hinten	1,00	0,026	58,8645	5	7,64	59.982,90	356.898,26
	Horizontal Quer	1,00	0,026	71,8532793	10	18,65	146.436,92	871.299,69
	Horizontal Vorne	1,00	0,026	58,8645	5	7,64	59.982,90	356.898,26
	Vertikal Quer	1,10	0,031	71,8532793	12	27,08	212.589,23	1.264.905,92
	Vertikal Quer Hinten	1,19	0,037	58,8645	12	26,16	205.360,86	1.221.897,10
	Vertikal Quer Vorne	0,54	0,008	58,8645	12	5,36	42.053,20	250.216,55
1	Horizontal Binde	0,37	0,004	41,20515	7	1,02	7.990,99	47.546,38
	Horizontal Hinten	0,25	0,002	58,8645	6	0,55	4.332,15	25.776,29
	Horizontal Quer	0,26	0,002	71,8532793	12	1,47	11.546,94	68.704,30
	Horizontal Vorne	0,37	0,004	58,8645	6	1,25	9.831,55	58.497,72
	Vertikal Quer	1,01	0,026	71,8532793	14	26,60	208.844,21	1.242.623,03
	Vertikal Quer Hinten	1,03	0,028	58,8645	14	22,84	179.274,71	1.066.684,54
	Vertikal Quer Vorne	0,36	0,003	58,8645	14	2,81	22.052,31	131.211,26
2	Horizontal Binde	0,29	0,002	41,20515	8	0,70	5.465,29	32.518,49
	Horizontal Hinten	0,27	0,002	58,8645	7	0,80	6.272,89	37.323,68
	Horizontal Quer	0,24	0,001	71,8532793	14	1,47	11.568,48	68.832,45
	Horizontal Vorne	0,27	0,002	58,8645	7	0,81	6.330,73	37.667,82
	Vertikal Quer	0,95	0,024	71,8532793	14	23,78	186.655,95	1.110.602,89
	Vertikal Quer Hinten	0,91	0,021	58,8645	14	17,57	137.956,91	820.843,64
	Vertikal Quer Vorne	0,22	0,001	58,8645	14	1,07	8.367,13	49.784,44
3	Horizontal Binde	0,29	0,002	41,20515	7	0,62	4.902,44	29.169,52
	Horizontal Hinten	0,16	0,001	58,8645	6	0,24	1.915,96	11.399,99
	Horizontal Quer	0,20	0,001	71,8532793	12	0,92	7.250,61	43.141,15
	Horizontal Vorne	0,23	0,001	58,8645	6	0,49	3.878,19	23.075,24
	Vertikal Quer	0,89	0,021	71,8532793	14	20,85	163.647,51	973.702,68
	Vertikal Quer Hinten	0,76	0,015	58,8645	14	12,51	98.191,35	584.238,54
	Vertikal Quer Vorne	0,50	0,006	58,8645	14	5,34	41.922,27	249.437,51
4	Horizontal Binde	0,19	0,001	41,20515	8	0,32	2.512,96	14.952,10
	Horizontal Hinten	0,16	0,001	58,8645	7	0,26	2.037,91	12.125,56
	Horizontal Quer	0,18	0,001	71,8532793	14	0,86	6.782,81	40.357,73
	Horizontal Vorne	0,18	0,001	58,8645	7	0,36	2.854,59	16.984,81
	Vertikal Quer	0,80	0,017	71,8532793	14	16,80	131.864,09	784.591,35
	Vertikal Quer Hinten	0,52	0,007	58,8645	14	5,70	44.768,40	266.371,99
	Vertikal Quer Vorne	0,58	0,009	58,8645	14	7,19	56.422,19	335.712,06

5	Horizontal Binde	0,16	0,001	41,20515	7	0,18	1.418,24	8.438,55
	Horizontal Hinten	0,19	0,001	58,8645	6	0,33	2.551,65	15.182,30
	Horizontal Quer	0,13	0,000	71,8532793	12	0,40	3.103,83	18.467,77
	Horizontal Vorne	0,16	0,001	58,8645	6	0,24	1.864,64	11.094,60
	Vertikal Quer	0,68	0,012	71,8532793	14	12,11	95.052,51	565.562,41
	Vertikal Quer Hinten	0,22	0,001	58,8645	14	1,01	7.945,85	47.277,78
	Vertikal Quer Vorne	0,60	0,009	58,8645	14	7,77	61.020,15	363.069,91
6	Horizontal Binde	0,39	0,004	41,20515	8	1,29	10.145,39	60.365,08
	Horizontal Hinten	0,19	0,001	58,8645	7	0,38	3.009,54	17.906,74
	Horizontal Quer	0,11	0,000	71,8532793	14	0,33	2.571,56	15.300,80
	Horizontal Vorne	0,21	0,001	58,8645	7	0,48	3.806,48	22.648,56
							2.344.723,02	13.951.101,97

Tabelle 84: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragstruktur mit Querstreben

Ebene	Ausrichtung	Mittlere Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0	Binde	1,00	0,026	40,78	9	9,53	74.803,27	445.079,44
	Horizontal Hinten	1,00	0,026	50,98	8	10,59	83.114,74	494.532,71
	Horizontal Quer	1,00	0,026	65,28	16	27,12	212.877,61	1.266.621,75
	Horizontal Vorne	1,00	0,026	50,98	8	10,59	83.114,74	494.532,71
	Quer Hinten	0,90	0,021	58,86	8	9,98	78.328,75	466.056,06
	Quer Quer	0,52	0,007	71,62	16	8,13	63.849,96	379.907,24
	Quer Vorne	0,30	0,002	58,86	8	1,14	8.926,98	53.115,52
	Vertikal Kurz Hinten	0,91	0,021	29,43	4	2,50	19.660,19	116.978,15
	Vertikal Kurz Vorne	0,61	0,010	29,43	4	1,14	8.935,57	53.166,61
	Vertikal Lang Hinten	1,25	0,040	58,86	5	11,88	93.225,00	554.688,75
	Vertikal Lang Vorne	0,54	0,008	58,86	5	2,23	17.533,98	104.327,20
	Vertikal Quer Kurz	0,81	0,017	50,29	4	3,42	26.815,82	159.554,10
Vertikal Quer Lang	1,07	0,030	71,62	5	10,60	83.173,02	494.879,49	
1	Binde	0,33	0,003	40,78	4	0,47	3.719,48	22.130,92
	Quer Hinten	0,76	0,015	58,86	8	7,04	55.232,34	328.632,43
	Quer Quer	0,52	0,007	71,62	16	7,93	62.231,26	370.276,02
	Quer Vorne	0,27	0,002	58,86	8	0,88	6.886,82	40.976,60
	Vertikal Hinten	1,18	0,036	58,86	4	8,54	67.029,20	398.823,72
	Vertikal Quer	1,04	0,028	71,62	4	8,11	63.649,96	378.717,26
	Vertikal Vorne	0,46	0,005	58,86	4	1,27	9.971,28	59.329,14

2	Binde	0,28	0,002	40,78	5	0,42	3.270,75	19.460,99
	Quer Hinten	0,18	0,001	58,86	8	0,38	2.956,95	17.593,83
	Quer Quer	0,49	0,006	71,62	16	7,01	55.020,05	327.369,32
	Quer Vorne	0,72	0,014	58,86	8	6,40	50.231,96	298.880,16
	Vertikal Hinten	1,11	0,032	58,86	5	9,46	74.294,34	442.051,33
	Vertikal Quer	1,03	0,028	71,62	5	9,89	77.648,91	462.011,04
	Vertikal Vorne	0,37	0,004	58,86	5	1,06	8.288,87	49.318,75
3	Binde	0,25	0,002	40,78	4	0,26	2.075,96	12.351,99
	Quer Hinten	0,65	0,011	58,86	8	5,22	41.006,42	243.988,22
	Quer Quer	0,47	0,006	71,62	16	6,50	51.018,07	303.557,51
	Quer Vorne	0,19	0,001	58,86	8	0,44	3.481,18	20.713,03
	Vertikal Hinten	1,04	0,028	58,86	4	6,65	52.188,03	310.518,77
	Vertikal Quer	0,99	0,025	71,62	4	7,22	56.647,11	337.050,31
	Vertikal Vorne	0,26	0,002	58,86	4	0,41	3.242,99	19.295,76
4	Binde	0,25	0,002	40,78	5	0,33	2.577,97	15.338,94
	Quer Hinten	0,58	0,009	58,86	8	4,16	32.693,93	194.528,87
	Quer Quer	0,44	0,005	71,62	16	5,82	45.710,15	271.975,40
	Quer Vorne	0,19	0,001	58,86	8	0,43	3.362,54	20.007,11
	Vertikal Hinten	0,96	0,024	58,86	5	7,06	55.434,69	329.836,41
	Vertikal Quer	0,97	0,024	71,62	5	8,76	68.752,33	409.076,37
	Vertikal Vorne	0,15	0,001	58,86	5	0,17	1.357,52	8.077,22
5	Binde	0,20	0,001	40,78	4	0,17	1.362,85	8.108,97
	Quer Hinten	0,51	0,007	58,86	8	3,21	25.186,80	149.861,49
	Quer Quer	0,42	0,005	71,62	16	5,26	41.329,33	245.909,52
	Quer Vorne	0,31	0,002	58,86	8	1,17	9.167,12	54.544,36
	Vertikal Hinten	0,88	0,020	58,86	4	4,72	37.088,44	220.676,19
	Vertikal Quer	0,91	0,022	71,62	4	6,17	48.457,18	288.320,21
	Vertikal Vorne	0,53	0,007	58,86	4	1,74	13.677,64	81.381,97
6	Binde	0,20	0,001	40,78	5	0,22	1.705,55	10.148,04
	Quer Hinten	0,42	0,005	58,86	8	2,18	17.135,24	101.954,69
	Quer Quer	0,40	0,004	71,62	16	4,68	36.707,89	218.411,93
	Quer Vorne	0,61	0,010	58,86	8	4,62	36.289,20	215.920,77
	Vertikal Hinten	0,78	0,016	58,86	5	4,63	36.344,60	216.250,34
	Vertikal Quer	0,89	0,020	71,62	5	7,30	57.297,58	340.920,63
	Vertikal Vorne	0,62	0,010	58,86	5	2,95	23.147,29	137.726,35
7	Binde	0,15	0,001	40,78	4	0,10	765,59	4.555,24
	Quer Hinten	0,36	0,003	58,86	8	1,56	12.239,25	72.823,54
	Quer Quer	0,37	0,004	71,62	16	4,03	31.618,10	188.127,69
	Quer Vorne	0,29	0,002	58,86	8	1,06	8.325,94	49.539,34
	Vertikal Hinten	0,68	0,012	58,86	4	2,79	21.913,20	130.383,56
	Vertikal Quer	0,82	0,017	71,62	4	4,95	38.869,21	231.271,81
	Vertikal Vorne	0,70	0,013	58,86	4	2,96	23.212,74	138.115,78

8	Binde	0,14	0,001	40,78	5	0,10	823,01	4.896,91
	Quer Hinten	0,20	0,001	58,86	8	0,48	3.790,15	22.551,39
	Quer Quer	0,34	0,003	71,62	16	3,52	27.599,13	164.214,85
	Quer Vorne	0,40	0,004	58,86	8	1,95	15.331,14	91.220,29
	Vertikal Hinten	0,53	0,007	58,86	5	2,14	16.791,44	99.909,04
	Vertikal Quer	0,76	0,015	71,62	5	5,32	41.724,96	248.263,50
	Vertikal Vorne	0,66	0,011	58,86	5	3,38	26.512,69	157.750,49
9	Binde	0,09	0,000	40,78	4	0,03	246,89	1.469,00
	Quer Hinten	0,35	0,003	58,86	8	1,52	11.958,42	71.152,62
	Quer Quer	0,29	0,002	71,62	16	2,53	19.842,69	118.063,99
	Quer Vorne	0,28	0,002	58,86	8	0,95	7.429,36	44.204,69
	Vertikal Hinten	0,93	0,023	58,86	4	5,33	41.869,29	249.122,30
	Vertikal Quer	0,68	0,012	71,62	4	3,46	27.129,30	161.419,35
	Vertikal Vorne	0,67	0,012	58,86	4	2,75	21.566,79	128.322,41
10	Binde	0,58	0,009	40,78	5	1,81	14.180,79	84.375,72
	Quer Hinten	0,37	0,004	58,86	8	1,66	13.007,60	77.395,20
	Quer Quer	0,34	0,003	71,62	16	3,53	27.718,59	164.925,59
	Quer Vorne	0,42	0,005	58,86	8	2,14	16.800,55	99.963,28
	Vertikal Hinten	0,37	0,004	29,43	5	0,53	4.147,81	24.679,44
	Vertikal Quer	0,70	0,013	50,29	5	3,24	25.416,63	151.228,93
	Vertikal Vorne	0,61	0,010	29,43	5	1,42	11.185,36	66.552,90
11	Binde	0,70	0,013	40,78	9	4,68	36.715,91	218.459,66
	Horizontal Hinten	0,30	0,002	50,98	8	0,96	7.513,72	44.706,65
	Horizontal Vorne	0,17	0,001	50,98	8	0,30	2.341,07	13.929,39
	Horizonzal Quer	0,65	0,011	65,28	16	11,39	89.412,68	532.005,45
							2.847.237,41	16.941.062,62

Tabelle 85: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur ohne Querstreben

Ebene	Ausrichtung	Mittlere Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0	Binde	1,00	0,026	40,78	9,00	9,53	74.803,27	445.079,44
	Horizontal Hinten	1,00	0,026	50,98	8,00	10,59	83.114,74	494.532,71
	Horizontal Vorne	1,00	0,026	50,98	8,00	10,59	83.114,74	494.532,71
	Quer Hinten	0,88	0,020	58,86	8,00	9,49	74.532,56	443.468,75
	Quer Vorne	0,30	0,002	58,86	8,00	1,09	8.517,80	50.680,92
	Vertikal Hinten	1,22	0,039	58,86	5,00	11,43	89.764,73	534.100,13
	Vertikal Kurz Hinten	0,89	0,021	29,43	4,00	2,43	19.090,77	113.590,06
	Vertikal Kurz Vorne	0,60	0,009	29,43	4,00	1,12	8.765,15	52.152,67
	Vertikal Quer	1,18	0,036	71,62	5,00	12,99	101.992,04	606.852,64
	Vertikal Quer Kurz	0,91	0,021	50,29	4,00	4,30	33.721,95	200.645,58
	Vertikal Vorne	0,58	0,009	58,86	5,00	2,58	20.273,18	120.625,41
1	Binde	0,44	0,005	40,78	4,00	0,81	6.327,22	37.646,98
	Quer Hinten	0,62	0,010	58,86	8,00	4,76	37.380,78	222.415,61
	Quer Vorne	0,29	0,002	58,86	8,00	1,04	8.169,22	48.606,88
	Vertikal Hinten	1,16	0,035	58,86	4,00	8,28	64.982,33	386.644,83
	Vertikal Quer	1,18	0,036	71,62	4,00	10,39	81.593,61	485.482,00
	Vertikal Vorne	0,52	0,007	58,86	4,00	1,68	13.173,72	78.383,63
2	Binde	0,39	0,004	40,78	5,00	0,81	6.327,22	37.646,96
	Quer Hinten	0,66	0,011	58,86	8,00	5,26	41.293,97	245.699,13
	Quer Vorne	0,16	0,001	58,86	8,00	0,31	2.420,37	14.401,22
	Vertikal Hinten	1,09	0,031	58,86	5,00	9,06	71.108,27	423.094,22
	Vertikal Quer	1,12	0,032	71,62	5,00	11,62	91.224,45	542.785,51
	Vertikal Vorne	0,42	0,005	58,86	5,00	1,34	10.530,33	62.655,46
3	Binde	0,39	0,004	40,78	4,00	0,64	5.061,78	30.117,57
	Quer Hinten	0,48	0,006	58,86	8,00	2,83	22.243,74	132.350,27
	Quer Vorne	0,16	0,001	58,86	8,00	0,32	5.529,23	15.048,90
	Vertikal Hinten	1,03	0,027	58,86	4,00	6,43	50.444,90	300.147,16
	Vertikal Quer	1,12	0,032	71,62	4,00	9,30	72.979,56	434.228,40
	Vertikal Vorne	0,35	0,003	58,86	4,00	0,73	5.738,33	34.143,06
4	Binde	0,34	0,003	40,78	5,00	0,60	4.745,42	28.235,22
	Quer Hinten	0,42	0,004	58,86	8,00	2,11	16.564,16	98.556,77
	Quer Vorne	0,17	0,001	58,86	8,00	0,37	2.910,30	17.316,30
	Vertikal Hinten	0,93	0,023	58,86	5,00	6,66	52.281,77	311.076,53
	Vertikal Quer	1,04	0,028	71,62	5,00	10,06	79.002,70	470.066,04
	Vertikal Vorne	0,23	0,001	58,86	5,00	0,42	3.290,52	19.578,60
5	Binde	0,34	0,003	40,78	4,00	0,48	3.796,33	22.588,18
	Quer Hinten	0,23	0,001	58,86	8,00	0,67	5.251,88	31.248,68
	Quer Vorne	0,35	0,003	58,86	8,00	1,52	11.926,87	70.964,90
	Vertikal Hinten	0,85	0,019	58,86	4,00	4,46	34.974,02	208.095,40
	Vertikal Quer	1,04	0,028	71,62	4,00	8,05	63.202,13	376.052,68
	Vertikal Vorne	0,12	0,000	58,86	4,00	0,08	640,61	3.811,62

6	Binde	0,28	0,002	40,78	5,00	0,40	3.163,61	18.823,48
	Quer Hinten	0,25	0,002	58,86	8,00	0,79	6.202,16	36.902,84
	Quer Vorne	0,56	0,008	58,86	8,00	3,90	30.599,29	182.065,79
	Vertikal Hinten	0,74	0,014	58,86	5,00	4,23	33.181,07	197.427,35
	Vertikal Quer	0,94	0,023	71,62	5,00	8,22	64.505,43	383.807,29
	Vertikal Vorne	0,51	0,007	58,86	5,00	1,98	15.520,33	92.345,98
7	Binde	0,28	0,002	40,78	4,00	0,32	2.530,89	15.058,79
	Quer Hinten	0,11	0,000	58,86	8,00	0,14	1.092,72	6.501,66
	Quer Vorne	0,47	0,006	58,86	8,00	2,64	20.761,84	123.532,93
	Vertikal Hinten	0,63	0,010	58,86	4,00	2,40	18.810,14	111.920,35
	Vertikal Quer	0,94	0,023	71,62	4,00	6,57	51.604,34	307.045,83
	Vertikal Vorne	0,63	0,010	58,86	4,00	2,42	18.990,10	112.991,10
8	Binde	0,20	0,001	40,78	5,00	0,20	1.581,81	9.411,74
	Quer Hinten	0,21	0,001	58,86	8,00	0,54	4.213,10	25.067,92
	Quer Vorne	0,40	0,004	58,86	8,00	1,96	15.411,85	91.700,53
	Vertikal Hinten	0,47	0,006	58,86	5,00	1,70	13.382,44	79.625,51
	Vertikal Quer	0,79	0,016	71,62	5,00	5,81	45.612,22	271.392,72
	Vertikal Vorne	0,62	0,010	58,86	5,00	2,95	23.124,33	137.589,76
9	Binde	0,20	0,001	40,78	4,00	0,16	1.265,44	7.529,39
	Quer Hinten	0,11	0,000	58,86	8,00	0,15	1.139,85	6.782,08
	Quer Vorne	0,41	0,004	58,86	8,00	2,02	15.852,73	94.323,75
	Vertikal Hinten	0,64	0,011	58,86	4,00	2,54	19.963,39	118.782,18
	Vertikal Quer	0,79	0,016	71,62	4,00	4,65	36.489,78	217.114,18
	Vertikal Vorne	0,65	0,011	58,86	4,00	2,56	20.119,18	119.709,11
10	Binde	0,01	0,000	40,78	5,00	0,00	4,17	24,83
	Quer Hinten	0,63	0,010	58,86	8,00	4,89	38.412,75	228.555,83
	Quer Vorne	0,39	0,004	58,86	8,00	1,84	14.409,57	85.736,95
	Vertikal Kurz Hinten	0,00	0,000	29,43	5,00	0,00	0,00	0,00
	Vertikal Kurz Vorne	0,01	0,000	29,43	5,00	0,00	1,55	9,25
	Vertikal Quer Kurz	0,00	0,000	50,29	5,00	0,00	0,00	0,00
11	Binde	0,00	0,000	40,78	9,00	0,00	0,31	1,86
	Horizontal Hinten	0,53	0,007	50,98	8,00	2,94	23.077,14	137.308,97
	Horizontal Vorne	0,08	0,000	50,98	8,00	0,07	529,66	3.151,48
							2.011.359,86	11.967.591,17

Tabelle 86: Gewicht und Kosten der Plattformhilfsstruktur beim Rotorblattwechsel

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
1,334073778	0,046	323,75	36,00	538,53	4.227.425,59	25.153.182,28

Tabelle 87: Gewicht und Kosten der Plattformhilfsstruktur beim Getriebewechsel

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
1,115178941	0,032	323,75	36,00	376,30	2.953.965,34	17.576.093,79

Tabelle 88: Gewicht und Kosten der Greifarmhilfsstruktur beim Rotorblattwechsel

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
1,523657522	0,060	323,75	18,00	351,23	2.757.153,85	16.405.065,42
1,523657522	0,060	407,83	10,00	245,80	1.929.558,23	11.480.871,44
1,523657522	0,060	306,27	10,00	184,59	1.449.039,89	8.621.787,35
					6.135.751,97	36.507.724,21

Tabelle 89: Gewicht und Kosten der Greifarmhilfsstruktur beim Getriebewechsel

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
1,223685602	0,039	323,75	18,00	226,55	1.778.385,80	10.581.395,48
1,223685602	0,039	407,83	10,00	158,55	1.244.580,14	7.405.251,86
1,223685602	0,039	306,27	10,00	119,06	934.642,06	5.561.120,26
					3.957.608,00	23.547.767,60

Tabella 90: Gewicht und Kosten der Kranschiene beim Getriebewechsel

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0,35	0,003	407,83	2,00	2,59	20.363,35	121.161,94

Tabella 91: Gewicht und Kosten der Kranschiene beim Rotorblattwechselwechsel

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0,25	0,002	407,83	2,00	1,32	10.389,46	61.817,32

Tabella 92: Gewicht und Kosten der Aufzughilfsstruktur

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0,31	0,002	179,59	32,00	14,17	111.235,54	661.851,46

Tabella 93: Gewicht und Kosten der Laufstege

Gewicht pro Meter [Kg/m]	Länge [m]	Anzahl	Preis pro Meter [€/m]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
152,700	3978,33	1,00	860,22	607.490,99	3.422.239,03

Tabella 94: Gewicht und Kosten des Helikopterlaufstegs

Gewicht pro Meter [Kg/m]	Länge [m]	Anzahl	Preis pro Meter [€/m]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
152,700	343,06	1,00	860,22	52.385,26	295.107,07

Tabelle 95: Gewicht und Kosten der hängenden Schienenführung

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0,05	0,000	407,83	5,00	0,13	1.038,95	6.181,73
0,05	0,000	306,27	5,00	0,10	780,22	4.642,29
					1.819,16	10.824,03

Tabelle 96: Gewicht und Kosten der Leitern

Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0,05	0,000	179,59	16,00	0,19	1.464,05	8.711,07
0,05	0,000	0,50	5132,00	0,17	1.307,38	7.778,89
					2.771,42	16.489,96

Tabelle 97: Gewicht und Kosten der Lagerhalle

Gewicht pro QMeter [Kg/m ²]	Fläche [m ²]	Anzahl	Preis pro QMeter [€/m ²]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
78,500	1960,00	1,00	467,08	153.860,00	915.467,00

Tabelle 98: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur ohne Querstreben unter Belastung der Laufstege

Ebene	Ausrichtung	Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0	Binde	1,00	0,026	40,78	9,00	9,53	74.803,27	445.079,44
	Horizontal Hinten	1,00	0,026	50,98	8,00	10,59	83.114,74	494.532,71
	Horizontal Vorne	1,00	0,026	50,98	8,00	10,59	83.114,74	494.532,71
	Quer Hinten	0,88	0,020	58,86	8,00	9,49	74.532,56	443.468,75
	Quer Vorne	0,28	0,002	58,86	8,00	0,98	7.671,31	45.644,28
	Vertikal Hinten	1,22	0,039	58,86	5,00	11,43	89.764,73	534.100,13
	Vertikal Kurz Hinten	0,89	0,021	29,43	4,00	2,43	19.090,77	113.590,06
	Vertikal Kurz Vorne	0,57	0,008	29,43	4,00	1,00	7.844,89	46.677,11
	Vertikal Quer	1,18	0,036	71,62	5,00	12,99	101.992,04	606.852,64
	Vertikal Quer Kurz	0,91	0,021	50,29	4,00	4,30	33.721,95	200.645,58
Vertikal Vorne	0,54	0,008	58,86	5,00	2,26	17.701,85	105.326,02	
1	Binde	0,44	0,005	40,78	4,00	0,81	6.327,22	37.646,98
	Quer Hinten	0,62	0,010	58,86	8,00	4,76	37.380,78	222.415,61
	Quer Vorne	0,26	0,002	58,86	8,00	0,83	6.510,67	38.738,48
	Vertikal Hinten	1,16	0,035	58,86	4,00	8,28	64.982,33	386.644,83
	Vertikal Quer	1,18	0,036	71,62	4,00	10,39	81.593,61	485.482,00
Vertikal Vorne	0,48	0,006	58,86	4,00	1,41	11.095,10	66.015,87	
2	Binde	0,39	0,004	40,78	5,00	0,81	6.327,22	37.646,96
	Quer Hinten	0,66	0,011	58,86	8,00	5,26	41.293,97	245.699,13
	Quer Vorne	0,15	0,001	58,86	8,00	0,26	2.020,20	12.020,20
	Vertikal Hinten	1,09	0,031	58,86	5,00	9,06	71.108,27	423.094,22
	Vertikal Quer	1,12	0,032	71,62	5,00	11,62	91.224,45	542.785,51
Vertikal Vorne	0,36	0,003	58,86	5,00	1,01	7.910,45	47.067,19	
3	Binde	0,39	0,004	40,78	4,00	0,64	5.061,78	30.117,57
	Quer Hinten	0,48	0,006	58,86	8,00	2,83	22.243,74	132.350,27
	Quer Vorne	0,18	0,001	58,86	8,00	0,38	2.994,77	17.818,89
	Vertikal Hinten	1,03	0,027	58,86	4,00	6,43	50.444,90	300.147,16
	Vertikal Quer	1,12	0,032	71,62	4,00	9,30	72.979,56	434.228,40
Vertikal Vorne	0,27	0,002	58,86	4,00	0,46	3.585,12	21.331,46	
4	Binde	0,34	0,003	40,78	5,00	0,60	4.745,42	28.235,22
	Quer Hinten	0,42	0,004	58,86	8,00	2,11	16.564,16	98.556,77
	Quer Vorne	0,43	0,005	58,86	8,00	2,23	17.508,16	104.173,53
	Vertikal Hinten	0,93	0,023	58,86	5,00	6,66	52.281,77	311.076,53
	Vertikal Quer	1,04	0,028	71,62	5,00	10,06	79.002,70	470.066,04
Vertikal Vorne	0,10	0,000	58,86	5,00	0,07	562,13	3.344,69	
5	Binde	0,34	0,003	40,78	4,00	0,48	3.796,33	22.588,18
	Quer Hinten	0,23	0,001	58,86	8,00	0,67	5.251,88	31.248,68
	Quer Vorne	0,37	0,003	58,86	8,00	1,63	12.792,27	76.114,03
	Vertikal Hinten	0,85	0,019	58,86	4,00	4,46	34.974,02	208.095,40
	Vertikal Quer	1,04	0,028	71,62	4,00	8,05	63.202,13	376.052,68
Vertikal Vorne	0,59	0,009	58,86	4,00	2,14	16.804,55	99.987,06	

6	Binde	0,28	0,002	40,78	5,00	0,40	3.163,61	18.823,48
	Quer Hinten	0,25	0,002	58,86	8,00	0,79	6.202,16	36.902,84
	Quer Vorne	0,29	0,002	58,86	8,00	1,05	8.205,08	48.820,22
	Vertikal Hinten	0,74	0,014	58,86	5,00	4,23	33.181,07	197.427,35
	Vertikal Quer	0,94	0,023	71,62	5,00	8,22	64.505,43	383.807,29
	Vertikal Vorne	0,70	0,013	58,86	5,00	3,76	29.552,91	175.839,79
7	Binde	0,28	0,002	40,78	4,00	0,32	2.530,89	15.058,79
	Quer Hinten	0,11	0,000	58,86	8,00	0,14	1.092,72	6.501,66
	Quer Vorne	0,48	0,006	58,86	8,00	2,78	21.787,51	129.635,66
	Vertikal Hinten	0,63	0,010	58,86	4,00	2,40	18.810,14	111.920,35
	Vertikal Quer	0,94	0,023	71,62	4,00	6,57	51.604,34	307.045,83
	Vertikal Vorne	0,76	0,015	58,86	4,00	3,54	27.756,57	165.151,61
8	Binde	0,20	0,001	40,78	5,00	0,20	1.581,81	9.411,74
	Quer Hinten	0,21	0,001	58,86	8,00	0,54	4.213,10	25.067,92
	Quer Vorne	0,61	0,010	58,86	8,00	4,52	35.487,34	211.149,64
	Vertikal Hinten	0,47	0,006	58,86	5,00	1,70	13.382,44	79.625,51
	Vertikal Quer	0,79	0,016	71,62	5,00	5,81	45.612,22	271.392,72
	Vertikal Vorne	0,75	0,015	58,86	5,00	4,35	34.134,99	203.103,19
9	Binde	0,20	0,001	40,78	4,00	0,16	1.265,44	7.529,39
	Quer Hinten	0,11	0,000	58,86	8,00	0,15	1.139,85	6.782,08
	Quer Vorne	0,44	0,005	58,86	8,00	2,33	18.275,62	108.739,91
	Vertikal Hinten	0,64	0,011	58,86	4,00	2,54	19.963,39	118.782,18
	Vertikal Quer	0,79	0,016	71,62	4,00	4,65	36.489,78	217.114,18
	Vertikal Vorne	0,77	0,015	58,86	4,00	3,60	28.261,21	168.154,18
10	Binde	0,01	0,000	40,78	5,00	0,00	4,51	26,81
	Quer Hinten	0,63	0,010	58,86	8,00	4,89	38.412,75	228.555,83
	Quer Vorne	0,57	0,008	58,86	8,00	3,98	31.205,45	185.672,40
	Vertikal Kurz Hinten	0,00	0,000	29,43	5,00	0,00	0,00	0,00
	Vertikal Kurz Vorne	0,46	0,005	29,43	5,00	0,81	6.329,74	37.661,95
	Vertikal Quer Kurz	0,00	0,000	50,29	5,00	0,00	0,00	0,00
11	Binde	0,00	0,000	40,78	9,00	0,00	1,71	10,19
	Horizontal Hinten	0,53	0,007	50,98	8,00	2,94	23.077,14	137.308,97
	Horizontal Vorne	0,11	0,000	50,98	8,00	0,12	919,79	5.472,73
							2.094.073,18	12.459.735,40

Tabelle 99: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur unter Belastung des Krans beim Getriebewechsel

Ebene	Ausrichtung	Stabdicke 1 [m]	Stabdicke 2 [m]	Stabdicke 3 [m]	Max. Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0	Binde	1,00	1,00	1,00	1,00	0,026	40,78	9,00	9,53	74.803,27	445.079,44
	Horizontal Hinten	1,00	1,00	1,00	1,00	0,026	50,98	8,00	10,59	83.114,74	494.532,71
	Horizontal Vorne	1,00	1,00	1,00	1,00	0,026	50,98	8,00	10,59	83.114,74	494.532,71
	Quer Hinten	0,88	0,88	0,88	0,88	0,020	58,86	8,00	9,49	74.532,56	443.468,75
	Quer Vorne	0,24	0,25	0,25	0,25	0,002	58,86	8,00	0,76	5.948,05	35.390,89
	Vertikal Hinten	1,22	1,22	1,22	1,22	0,039	58,86	5,00	11,43	89.764,73	534.100,13
	Vertikal Kurz Hinten	0,89	0,89	0,89	0,89	0,021	29,43	4,00	2,43	19.090,77	113.590,06
	Vertikal Kurz Vorne	0,49	0,50	0,50	0,50	0,006	29,43	4,00	0,77	6.005,81	35.734,58
	Vertikal Quer Kurz	1,18	1,18	1,18	1,18	0,036	71,62	5,00	12,99	101.992,04	606.852,64
	Vertikal Quer Vorne	0,91	0,91	0,91	0,91	0,021	50,29	4,00	4,30	33.721,95	200.645,58
1	Binde	0,44	0,44	0,44	0,44	0,005	40,78	4,00	0,81	6.327,22	37.646,98
	Quer Hinten	0,62	0,62	0,62	0,62	0,010	58,86	8,00	4,76	37.380,78	222.415,61
	Quer Vorne	0,41	0,16	0,15	0,41	0,004	58,86	8,00	2,08	16.296,89	96.966,50
	Vertikal Hinten	1,16	1,16	1,16	1,16	0,035	58,86	4,00	8,28	64.982,33	386.644,83
	Vertikal Quer	1,18	1,18	1,18	1,18	0,036	71,62	4,00	10,39	81.593,61	485.482,00
	Vertikal Vorne	0,37	0,38	0,38	0,38	0,004	58,86	4,00	0,90	7.055,30	41.979,03
2	Binde	0,39	0,39	0,39	0,39	0,004	40,78	5,00	0,81	6.327,22	37.646,96
	Quer Hinten	0,66	0,66	0,66	0,66	0,011	58,86	8,00	5,26	41.293,97	245.699,13
	Quer Vorne	0,48	0,20	0,19	0,48	0,006	58,86	8,00	2,80	21.980,13	130.781,76
	Vertikal Hinten	1,09	1,09	1,09	1,09	0,031	58,86	5,00	9,06	71.108,27	423.094,22
	Vertikal Quer	1,12	1,12	1,12	1,12	0,032	71,62	5,00	11,62	91.224,45	542.785,51
3	Binde	0,22	0,25	0,23	0,25	0,002	58,86	5,00	0,46	3.616,09	21.515,73
	Quer Hinten	0,39	0,39	0,39	0,39	0,004	40,78	4,00	0,64	5.061,78	30.117,57
	Quer Vorne	0,48	0,48	0,48	0,48	0,006	58,86	8,00	2,83	22.243,74	132.350,27
	Quer Vorne	0,54	0,33	0,36	0,54	0,007	58,86	8,00	3,50	27.485,53	163.538,92
	Vertikal Hinten	1,03	1,03	1,03	1,03	0,027	58,86	4,00	6,43	50.444,90	300.147,16
	Vertikal Quer	1,12	1,12	1,12	1,12	0,032	71,62	4,00	9,30	72.979,56	434.228,40
4	Binde	0,22	0,08	0,44	0,44	0,005	58,86	4,00	1,19	9.313,78	55.417,00
	Binde	0,34	0,34	0,34	0,34	0,003	40,78	5,00	0,60	4.745,42	28.235,22
	Quer Hinten	0,42	0,42	0,42	0,42	0,004	58,86	8,00	2,11	16.564,16	98.556,77
	Quer Vorne	0,23	0,26	0,24	0,26	0,002	58,86	8,00	0,80	6.301,20	37.492,12
	Vertikal Hinten	0,93	0,93	0,93	0,93	0,023	58,86	5,00	6,66	52.281,77	311.076,53
	Vertikal Quer	1,04	1,04	1,04	1,04	0,028	71,62	5,00	10,06	79.002,70	470.066,04
5	Vertikal Vorne	0,68	0,64	0,66	0,68	0,012	58,86	5,00	3,52	27.605,81	164.254,56
	Binde	0,34	0,34	0,34	0,34	0,003	40,78	4,00	0,48	3.796,33	22.588,18
	Quer Hinten	0,23	0,23	0,23	0,23	0,001	58,86	8,00	0,67	5.251,88	31.248,68
	Quer Vorne	0,47	0,36	0,52	0,52	0,007	58,86	8,00	3,35	26.296,37	156.463,42
	Vertikal Hinten	0,85	0,85	0,85	0,85	0,019	58,86	4,00	4,46	34.974,02	208.095,40
	Vertikal Quer	1,04	1,04	1,04	1,04	0,028	71,62	4,00	8,05	63.202,13	376.052,68
Vertikal Vorne	0,76	0,76	0,76	0,76	0,015	58,86	4,00	3,57	27.992,76	166.556,92	

6	Binde	0,28	0,28	0,28	0,28	0,002	40,78	5,00	0,40	3.163,61	18.823,48
	Quer Hinten	0,25	0,25	0,25	0,25	0,002	58,86	8,00	0,79	6.202,16	36.902,84
	Quer Vorne	0,23	0,30	0,38	0,38	0,004	58,86	8,00	1,74	13.621,56	81.048,27
	Vertikal Hinten	0,74	0,74	0,74	0,74	0,014	58,86	5,00	4,23	33.181,07	197.427,35
	Vertikal Quer	0,94	0,94	0,94	0,94	0,023	71,62	5,00	8,22	64.505,43	383.807,29
	Vertikal Vorne	0,81	0,78	0,80	0,81	0,017	58,86	5,00	5,05	39.650,37	235.919,71
7	Binde	0,28	0,28	0,28	0,28	0,002	40,78	4,00	0,32	2.530,89	15.058,79
	Quer Hinten	0,11	0,11	0,11	0,11	0,000	58,86	8,00	0,14	1.092,72	6.501,66
	Quer Vorne	0,53	0,36	0,49	0,53	0,007	58,86	8,00	3,44	27.033,95	160.851,99
	Vertikal Hinten	0,63	0,63	0,63	0,63	0,010	58,86	4,00	2,40	18.810,14	111.920,35
	Vertikal Quer	0,94	0,94	0,94	0,94	0,023	71,62	4,00	6,57	51.604,34	307.045,83
	Vertikal Vorne	0,82	0,83	0,83	0,83	0,018	58,86	4,00	4,25	33.339,69	198.371,14
8	Binde	0,20	0,20	0,20	0,20	0,001	40,78	5,00	0,20	1.581,81	9.411,74
	Quer Hinten	0,21	0,21	0,21	0,21	0,001	58,86	8,00	0,54	4.213,10	25.067,92
	Quer Vorne	0,21	0,66	0,28	0,66	0,011	58,86	8,00	5,34	41.955,77	249.636,81
	Vertikal Hinten	0,47	0,47	0,47	0,47	0,006	58,86	5,00	1,70	13.382,44	79.625,51
	Vertikal Quer	0,79	0,79	0,79	0,79	0,016	71,62	5,00	5,81	45.612,22	271.392,72
	Vertikal Vorne	0,83	0,77	0,80	0,83	0,018	58,86	5,00	5,28	41.452,66	246.643,32
9	Binde	0,20	0,20	0,20	0,20	0,001	40,78	4,00	0,16	1.265,44	7.529,39
	Quer Hinten	0,11	0,11	0,11	0,11	0,000	58,86	8,00	0,15	1.139,85	6.782,08
	Quer Vorne	0,56	0,38	0,44	0,56	0,008	58,86	8,00	3,83	30.052,37	178.811,59
	Vertikal Hinten	0,64	0,64	0,64	0,64	0,011	58,86	4,00	2,54	19.963,39	118.782,18
	Vertikal Quer	0,79	0,79	0,79	0,79	0,016	71,62	4,00	4,65	36.489,78	217.114,18
	Vertikal Vorne	0,74	0,84	0,79	0,84	0,018	58,86	4,00	4,27	33.524,77	199.472,37
10	Binde	0,01	0,01	0,01	0,01	0,000	40,78	5,00	0,00	4,40	26,17
	Quer Hinten	0,63	0,63	0,63	0,63	0,010	58,86	8,00	4,89	38.412,75	228.555,83
	Quer Vorne	0,15	0,53	0,23	0,53	0,007	58,86	8,00	3,42	26.856,39	159.795,49
	Vertikal Kurz Hinten	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	29,43	5,00	0,00	0,03	0,15
	Vertikal Kurz Vorne	0,56	0,19	0,47	0,56	0,008	29,43	5,00	1,18	9.255,96	55.072,94
	Vertikal Quer Kurz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	50,29	5,00	0,00	0,00	0,00
11	Binde	0,01	0,01	0,01	0,01	0,000	40,78	9,00	0,00	3,88	23,08
	Horizontal Hinten	0,53	0,53	0,53	0,53	0,007	50,98	8,00	2,94	23.077,14	137.308,97
	Horizontal Vorne	0,11	0,11	0,11	0,11	0,000	50,98	8,00	0,13	1.051,94	6.259,05
										2.233.335,02	13.288.343,38

Tabelle 100: Berechnung des Gewichts der vertikalen Tragestruktur unter Belastung des Krans beim Rotorblattwechsel

Ebene	Ausrichtung	Stabdicke 1 [m]	Stabdicke 2 [m]	Stabdicke 3 [m]	Max. Stabdicke [m]	Querschnittsfläche [m ²]	Länge [m]	Anzahl	Volumen [m ³]	Gewicht [Kg]	Preis [€]
0	Binde	1,00	1,00	1,00	1,00	0,026	40,78	9,00	9,53	74.803,27	445.079,44
	Horizontal Hinten	1,00	1,00	1,00	1,00	0,026	50,98	8,00	10,59	83.114,74	494.532,71
	Horizontal Vorne	1,00	1,00	1,00	1,00	0,026	50,98	8,00	10,59	83.114,74	494.532,71
	Quer Hinten	0,88	0,88	0,88	0,88	0,020	58,86	8,00	9,49	74.532,56	443.468,75
	Quer Vorne	0,26	0,26	0,26	0,26	0,002	58,86	8,00	0,83	6.500,50	38.677,98
	Vertikal Hinten	1,22	1,22	1,22	1,22	0,039	58,86	5,00	11,43	89.764,73	534.100,13
	Vertikal Kurz Hinten	0,89	0,89	0,89	0,89	0,021	29,43	4,00	2,43	19.090,77	113.590,06
	Vertikal Kurz Vorne	0,52	0,52	0,52	0,52	0,007	29,43	4,00	0,84	6.600,72	39.274,27
	Vertikal Quer	1,18	1,18	1,18	1,18	0,036	71,62	5,00	12,99	101.992,04	606.852,64
	Vertikal Quer Kurz	0,91	0,91	0,91	0,91	0,021	50,29	4,00	4,30	33.721,95	200.645,58
Vertikal Vorne	0,48	0,49	0,48	0,49	0,006	58,86	5,00	1,80	14.148,00	84.180,63	
1	Binde	0,44	0,44	0,44	0,44	0,005	40,78	4,00	0,81	6.327,22	37.646,98
	Quer Hinten	0,62	0,62	0,62	0,62	0,010	58,86	8,00	4,76	37.380,78	222.415,61
	Quer Vorne	0,54	0,51	0,53	0,54	0,008	58,86	8,00	3,61	28.333,24	168.582,77
	Vertikal Hinten	1,16	1,16	1,16	1,16	0,035	58,86	4,00	8,28	64.982,33	386.644,83
	Vertikal Quer	1,18	1,18	1,18	1,18	0,036	71,62	4,00	10,39	81.593,61	485.482,00
	Vertikal Vorne	0,42	0,42	0,42	0,42	0,005	58,86	4,00	1,07	8.416,35	50.077,27
2	Binde	0,39	0,39	0,39	0,39	0,004	40,78	5,00	0,81	6.327,22	37.646,96
	Quer Hinten	0,66	0,66	0,66	0,66	0,011	58,86	8,00	5,26	41.293,97	245.699,13
	Quer Vorne	0,43	0,38	0,41	0,43	0,005	58,86	8,00	2,23	17.499,78	104.123,69
	Vertikal Hinten	1,09	1,09	1,09	1,09	0,031	58,86	5,00	9,06	71.108,27	423.094,22
	Vertikal Quer	1,12	1,12	1,12	1,12	0,032	71,62	5,00	11,62	91.224,45	542.785,51
	Vertikal Vorne	0,29	0,30	0,30	0,30	0,002	58,86	5,00	0,68	5.305,67	31.568,71
3	Binde	0,39	0,39	0,39	0,39	0,004	40,78	4,00	0,64	5.061,78	30.117,57
	Quer Hinten	0,48	0,48	0,48	0,48	0,006	58,86	8,00	2,83	22.243,74	132.350,27
	Quer Vorne	0,17	0,17	0,17	0,17	0,001	58,86	8,00	0,36	2.849,83	16.956,47
	Vertikal Hinten	1,03	1,03	1,03	1,03	0,027	58,86	4,00	6,43	50.444,90	300.147,16
	Vertikal Quer	1,12	1,12	1,12	1,12	0,032	71,62	4,00	9,30	72.979,56	434.228,40
	Vertikal Vorne	0,19	0,19	0,19	0,19	0,001	58,86	4,00	0,22	1.762,96	10.489,58
4	Binde	0,34	0,34	0,34	0,34	0,003	40,78	5,00	0,60	4.745,42	28.235,22
	Quer Hinten	0,42	0,42	0,42	0,42	0,004	58,86	8,00	2,11	16.564,16	98.556,77
	Quer Vorne	0,54	0,23	0,22	0,54	0,008	58,86	8,00	3,61	28.327,30	168.547,46
	Vertikal Hinten	0,93	0,93	0,93	0,93	0,023	58,86	5,00	6,66	52.281,77	311.076,53
	Vertikal Quer	1,04	1,04	1,04	1,04	0,028	71,62	5,00	10,06	79.002,70	470.066,04
	Vertikal Vorne	0,51	0,49	0,50	0,51	0,007	58,86	5,00	2,00	15.675,69	93.270,35
5	Binde	0,34	0,34	0,34	0,34	0,003	40,78	4,00	0,48	3.796,33	22.588,18
	Quer Hinten	0,23	0,23	0,23	0,23	0,001	58,86	8,00	0,67	5.251,88	31.248,68
	Quer Vorne	0,71	0,66	0,50	0,71	0,013	58,86	8,00	6,17	48.398,54	287.971,33
	Vertikal Hinten	0,85	0,85	0,85	0,85	0,019	58,86	4,00	4,46	34.974,02	208.095,40
	Vertikal Quer	1,04	1,04	1,04	1,04	0,028	71,62	4,00	8,05	63.202,13	376.052,68
	Vertikal Vorne	0,67	0,67	0,67	0,67	0,012	58,86	4,00	2,77	21.720,84	129.238,97

6	Binde	0,28	0,28	0,28	0,28	0,002	40,78	5,00	0,40	3.163,61	18.823,48
	Quer Hinten	0,25	0,25	0,25	0,25	0,002	58,86	8,00	0,79	6.202,16	36.902,84
	Quer Vorne	0,33	0,43	0,46	0,46	0,006	58,86	8,00	2,64	20.698,23	123.154,50
	Vertikal Hinten	0,74	0,74	0,74	0,74	0,014	58,86	5,00	4,23	33.181,07	197.427,35
	Vertikal Quer	0,94	0,94	0,94	0,94	0,023	71,62	5,00	8,22	64.505,43	383.807,29
7	Vertikal Vorne	0,73	0,72	0,73	0,73	0,014	58,86	5,00	4,10	32.173,77	191.433,95
	Binde	0,28	0,28	0,28	0,28	0,002	40,78	4,00	0,32	2.530,89	15.058,79
	Quer Hinten	0,11	0,11	0,11	0,11	0,000	58,86	8,00	0,14	1.092,72	6.501,66
	Quer Vorne	0,49	0,46	0,48	0,49	0,006	58,86	8,00	2,98	23.386,08	139.147,16
	Vertikal Hinten	0,63	0,63	0,63	0,63	0,010	58,86	4,00	2,40	18.810,14	111.920,35
8	Vertikal Quer	0,94	0,94	0,94	0,94	0,023	71,62	4,00	6,57	51.604,34	307.045,83
	Vertikal Vorne	0,76	0,76	0,76	0,76	0,015	58,86	4,00	3,58	28.081,93	167.087,51
	Binde	0,20	0,20	0,20	0,20	0,001	40,78	5,00	0,20	1.581,81	9.411,74
	Quer Hinten	0,21	0,21	0,21	0,21	0,001	58,86	8,00	0,54	4.213,10	25.067,92
	Quer Vorne	0,65	0,49	0,51	0,65	0,011	58,86	8,00	5,15	40.393,30	240.340,13
9	Vertikal Hinten	0,47	0,47	0,47	0,47	0,006	58,86	5,00	1,70	13.382,44	79.625,51
	Vertikal Quer	0,79	0,79	0,79	0,79	0,016	71,62	5,00	5,81	45.612,22	271.392,72
	Vertikal Vorne	0,74	0,72	0,73	0,74	0,014	58,86	5,00	4,22	33.125,15	197.094,67
	Binde	0,20	0,20	0,20	0,20	0,001	40,78	4,00	0,16	1.265,44	7.529,39
	Quer Hinten	0,11	0,11	0,11	0,11	0,000	58,86	8,00	0,15	1.139,85	6.782,08
10	Quer Vorne	0,47	0,49	0,42	0,49	0,006	58,86	8,00	2,99	23.444,54	139.495,00
	Vertikal Hinten	0,64	0,64	0,64	0,64	0,011	58,86	4,00	2,54	19.963,39	118.782,18
	Vertikal Quer	0,79	0,79	0,79	0,79	0,016	71,62	4,00	4,65	36.489,78	217.114,18
	Vertikal Vorne	0,71	0,74	0,72	0,74	0,014	58,86	4,00	3,34	26.186,98	155.812,55
	Binde	0,01	0,01	0,01	0,01	0,000	40,78	5,00	0,00	4,11	24,43
11	Quer Hinten	0,63	0,63	0,63	0,63	0,010	58,86	8,00	4,89	38.412,75	228.555,83
	Quer Vorne	0,39	0,30	0,29	0,39	0,004	58,86	8,00	1,85	14.561,23	86.639,34
	Vertikal Kurz Hinten	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	29,43	5,00	0,00	0,00	0,00
	Vertikal Kurz Vorne	0,42	0,19	0,37	0,42	0,005	29,43	5,00	0,66	5.209,94	30.999,15
	Vertikal Quer Kurz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	50,29	5,00	0,00	0,00	0,00
11	Binde	0,01	0,01	0,01	0,01	0,000	40,78	9,00	0,00	3,01	17,94
	Horizontal Hinten	0,53	0,53	0,53	0,53	0,007	50,98	8,00	2,94	23.077,14	137.308,97
	Horizontal Vorne	0,09	0,09	0,09	0,09	0,000	50,98	8,00	0,09	735,39	4.375,60
										2.190.692,39	13.034.619,70

Tabelle 101: Gesamtgewicht der ausgewählten Varianten

Variante	71	72	37	32	21	25
Tragestruktur [Kg]	2.190.692	2.190.692	2.094.073	2.094.073	2.190.692	2.190.692
Rotoren [Kg]	905.895	905.895	905.895	905.895	905.895	905.895
Gondeln [Kg]	1.488.060	1.488.060	1.488.060	1.488.060	1.488.060	1.488.060
Laufstege [Kg]	607.491	607.491	607.491	607.491	607.491	659.876
Leitern [Kg]	2.771	2.771	2.771	2.771	2.771	2.771
Übergabe Großteile [Kg]	40.000	40.000	40.000	30.000	30.000	40.000
Inspektion [Kg]	18	18	1.300	18	14	6
Geringfügige Wartung [Kg]	25	1.300	In Inspektion	25	In Inspektion	14
Kleinteiltransport (V) [Kg]	2.160	2.160	384	In Großteiltransport	160	3.640
Kleinteiltransport (H) [Kg]	1.819	50	In Kleinteiltransport (V)	50	x	84
Großteiltransport [Kg]	12.800	12.800	21.000	30.000	12.800	12.800
Personaltransport (V) [Kg]	In Kleinteiltransport (V)	In Kleinteiltransport (V)	2.160	In Großteiltransport	2.160	In Kleinteiltransport (V)
Hilfsstrukturen [Kg]	121.625	121.625	1.889.621	2.964.355	132.014	10.389
Lagerhalle [Kg]	175.572	176.072	176.072	x	175.572	175.572
Gesamtgewicht [Kg]	5.548.929	5.548.935	7.228.828	8.122.738	5.547.631	5.489.801

Tabelle 102: Zeitbetrachtung der Variante 71 Einlagern

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Großteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Personal	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	30,00	30,00
Übergabe Großteile	4.590,38	75,00	150,00	211,21
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	75,00	40,00	40,00
Inspektion	0,00	0,00	460,00	460,00
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	5,00	5,00	37,58
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	18,00	2,00	73,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	417,83	66,60	0,00	6,27

Tabelle 103: Zeitbetrachtung der Variante 71 Aus Lager Entnehmen

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Großteile	0,00	370,00	0,00	0,00
Antransport Personal	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	30,00	30,00
Übergabe Großteile	611,74	75,00	0,00	8,16
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspektion	0,00	0,00	460,00	460,00
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	5,00	5,00	37,58
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	18,00	2,00	73,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	101,96	66,60	0,00	1,53

Tabelle 104: Zeitbetrachtung der Variante 71 Ohne Lager

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Großteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Personal	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	30,00	30,00
Übergabe Großteile	835,66	75,00	30,00	41,14
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	75,00	0,00	0,00
Inspektion	0,00	0,00	460,00	460,00
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	5,00	5,00	37,58
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	18,00	2,00	73,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	417,83	66,60	0,00	6,27

Tabelle 105: Zeitbetrachtung der Variante 72 Einlagern

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	771,60	0,00	259,20
Antransport Großteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Personal	200.000,00	771,60	0,00	259,20
Übergabe Kleinteile	3.714,72	66,60	150,00	205,78
Übergabe Großteile	4.590,38	75,00	150,00	211,21
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	75,00	80,00	80,00
Inspektion	0,00	0,00	460,00	460,00
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	5,00	55,50	88,08
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	18,00	2,00	73,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	417,83	66,60	0,00	6,27

Tabelle 106: Zeitbetrachtung der Variante 72 Aus Lager Entnehmen

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	0,00	771,60	0,00	0,00
Antransport Großteile	0,00	370,00	0,00	0,00
Antransport Personal	200.000,00	771,60	0,00	259,20
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	0,00	0,00
Übergabe Großteile	611,74	75,00	0,00	8,16
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspektion	0,00	0,00	460,00	460,00
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	5,00	55,50	88,08
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	18,00	2,00	73,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	203,92	66,60	1,00	4,06
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	101,96	66,60	0,00	1,53

Tabelle 107: Zeitbetrachtung der Variante 37 Einlagern

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Großteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Personal	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Übergabe Kleinteile	3.714,72	66,60	150,00	205,78
Übergabe Großteile	4.590,38	75,00	150,00	211,21
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	75,00	80,00	80,00
Inspektion	3.665,25	9,00	220,00	627,25
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	5,00	55,50	88,08
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	16,00	2,00	82,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	12,00	20,00	127,92
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	417,83	66,60	0,00	6,27

Tabelle 108: Zeitbetrachtung der Variante 37 Aus Lager Entnehmen

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	0,00	370,00	0,00	0,00
Antransport Großteile	0,00	370,00	0,00	0,00
Antransport Personal	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	0,00	0,00
Übergabe Großteile	611,74	75,00	0,00	8,16
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspektion	3.665,25	9,00	85,00	492,25
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	5,00	55,50	88,08
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	16,00	2,00	82,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	203,92	66,60	1,00	4,06
Großteiltransport	1.295,00	12,00	20,00	127,92
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	101,96	66,60	0,00	1,53

Tabelle 109: Zeitbetrachtung der Variante 32 Ohne Lager

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Großteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Personal	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	30,00	30,00
Übergabe Großteile	835,66	80,00	30,00	40,45
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	80,00	0,00	0,00
Inspektion	0,00	0,00	460,00	460,00
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	5,00	5,00	37,58
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	15,00	2,00	88,33
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	15,00	20,00	106,33
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	15,00	0,00	43,17
Personaltransport (Horizontal) (x1)	417,83	66,60	0,00	6,27

Tabelle 110: Zeitbetrachtung der Variante 21 Einlagern

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Großteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Personal	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	30,00	30,00
Übergabe Großteile	4.590,38	80,00	150,00	207,38
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	80,00	40,00	40,00
Inspektion	3.665,25	9,00	150,00	557,25
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	4,00	47,00	87,73
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	17,00	3,00	79,18
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	417,83	66,60	0,00	6,27

Tabelle 111: Zeitbetrachtung der Variante 21 Aus Lager Entnehmen

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Antransport Großteile	0,00	370,00	0,00	0,00
Antransport Personal	200.000,00	370,00	0,00	540,54
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	30,00	30,00
Übergabe Großteile	611,74	80,00	0,00	7,65
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspektion	3.665,25	9,00	85,00	492,25
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	4,00	47,00	87,73
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	17,00	3,00	79,18
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	18,00	0,00	35,97
Personaltransport (Horizontal) (x1)	101,96	66,60	0,00	1,53

Tabelle 112: Zeitbetrachtung der Variante 25 Einlagern

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	3.500,00	0,00	57,14
Antransport Großteile	200.000,00	431,60	0,00	463,39
Antransport Personal	200.000,00	3.500,00	0,00	57,14
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	30,00	30,00
Übergabe Großteile	4.590,38	75,00	150,00	211,21
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	75,00	40,00	40,00
Inspektion	3.729,41	1.300,00	460,00	462,87
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	4,00	47,00	87,73
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	16,00	2,00	82,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	16,00	0,00	40,47
Personaltransport (Horizontal) (x1)	417,83	66,60	0,00	6,27

Tabelle 113: Zeitbetrachtung der Variante 25 Aus Lager Entnehmen

Bewegung	Strecke [m]	Geschwindigkeit [m/min]	Zusatz [min]	Zeit [min]
Antransport Kleinteile	200.000,00	3.500,00	0,00	57,14
Antransport Großteile	0,00	431,60	0,00	0,00
Antransport Personal	200.000,00	3.500,00	0,00	57,14
Übergabe Kleinteile	0,00	66,60	30,00	30,00
Übergabe Großteile	611,74	75,00	0,00	8,16
Übergabe Personal	0,00	66,60	15,00	15,00
Bauteillagerung	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspektion	3.729,41	1.300,00	460,00	462,87
Wartung/ Geringfügige Reparatur	162,90	4,00	47,00	87,73
Kleinteiltransport (Vertikal)	1.295,00	16,00	2,00	82,94
Kleinteiltransport (Horizontal)	835,66	66,60	1,00	13,55
Großteiltransport	1.295,00	120,00	40,00	50,79
Personaltransport (Vertikal) (x1)	647,50	16,00	0,00	40,47
Personaltransport (Horizontal) (x1)	101,96	66,60	0,00	1,53

Tabelle 114: Investitionskosten der Varianten

Variante	71	72	37	32	21	25
Tragestruktur [€]	13.034.620	13.034.620	12.459.735	12.459.735	13.034.620	13.034.620
Rotoren [€]	19.590.057	19.590.057	19.590.057	19.590.057	19.590.057	19.590.057
Gondeln [€]	40.239.036	40.239.036	40.239.036	40.239.036	40.239.036	40.239.036
Laufstege [€]	3.422.239	3.422.239	3.422.239	3.422.239	3.422.239	3.717.346
Leitern [€]	16.490	16.490	16.490	16.490	16.490	16.490
Übergabe Großteile [€]	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
Inspektion [€]	202.500	202.500	300.000	202.500	1.977	20.000
Geringfügige Wartung [€]	100.000	300.000	In Inspektion	100.000	In Inspektion	1.977
Kleinteiltransport (V) [€]	136.000	136.000	96.000	In Großteiltransport	70.548	144.000
Kleinteiltransport (H) [€]	10.824	348	In Kleinteiltransport (V)	348	x	947
Großteiltransport [€]	650.000	650.000	850.000	1.000.000	650.000	650.000
Personaltransport (V) [€]	In Kleinteiltransport (V)	In Kleinteiltransport (V)	136.000	In Großteiltransport	136.000	In Kleinteiltransport (V)
Hilfsstrukturen [€]	723.669	723.669	11.243.247	17.637.911	785.486	61.817
Lagerhalle [€]	915.467	915.467	915.467	x	915.467	915.467
Investitionskosten [€]	79.340.901	79.530.425	89.568.271	94.968.317	79.161.919	78.691.757

Tabelle 115: Anlagenkosten und Stromgestehungskosten der Varianten

Variante	71	72	37	32	21	25
Investitionskosten [€]	79.340.901	79.530.425	89.568.271	94.968.317	79.161.919	78.691.757
Installationskosten [€]	23.802.270	23.859.128	26.870.481	28.490.495	23.748.576	23.607.527
OPEX fix [€]	3.150.000	3.150.000	3.150.000	3.150.000	3.150.000	3.150.000
OPEX var [€]	32.305.875	32.286.238	32.219.397	32.285.848	32.231.623	32.360.558
Lohnkosten [€]	436.256	383.170	548.307	442.973	517.960	182.683
Charterkosten [€]	13.640.000	8.758.000	16.120.000	13.640.000	16.120.000	3.700.000
Gesamtkosten [€]	152.675.303	147.966.961	168.476.457	172.977.633	154.930.078	141.692.525
Energieertrag [kWh]	4.038.234.436	4.035.779.707	4.027.424.662	4.035.731.020	4.028.952.854	4.045.069.807
LCoE [€/kWh]	0,0378	0,0367	0,0418	0,0429	0,0385	0,0350
dLCoE [€/kWh]	0,0028	0,0016	0,0068	0,0078	0,0034	0,0000