



Schlussbericht

Entwicklung innovativer Technologien für die Fertigung schwimmender Unterstrukturen

Dr.-Ing. Robert Staschko
Dipl.-Ing. Doris Hasselfeldt
Dipl.-Ing. IWE Hagen Herholz
M.Sc. IWE Paul Breinlinger

Rostock, 27.01.2023



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03WKDC1A gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung und Motivation	7
2 Stand der Wissenschaft und Technik	11
2.1 Bauweisen schwimmender Offshore-Gründungsstrukturen.....	11
2.2 Design und Fertigungskriterien	13
2.3 Beschichtungstechnologien	15
2.4 Handling und Transport	16
3 Methodisches Vorgehen.....	19
4 Ergebnisse	21
4.1 Technologien für die Fertigung unterstrukturtypenunabhängiger Auftriebskörper und Systemkomponenten	21
4.1.1 Sicherstellung der strukturellen Integrität	21
4.1.2 Standardisierung von Versteifungselementen	26
4.1.3 Automatisierung des Fügeprozesses für Versteifungselemente	29
4.1.4 CAD/CAM-Workflows für die Fertigung von schwimmenden Offshore- Wind-Foundations	32
4.2 Planungstechnologien für Zwei-Produkt-Matrix Fertigungsstätten und markadaptiv global vernetzte Wertschöpfungsprozesse.....	34
4.2.1 Fertigungsprozessintegrierte Baumethodikbewertung.....	34
4.2.2 Installationsoptimierte Wertschöpfungsnetzwerkplanung	38
4.3 Unterstrukturtypenunabhängige automatisierte und fertigungsintegrierte Beschichtungstechnologien	41
4.3.1 Beschichtungsprozesse	42
4.3.2 Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltaspekte bei der Beschichtung von FOWF	44
4.4 Universelle modulbasierte Transport- und Handhabungstechnologien.....	47
5 Zusammenfassung.....	51
6 Literatur	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Konzepte für schwimmende Unterstrukturen [4].....	8
Abbildung 2:	Exemplarische Fertigungstechnologien für FOWF am Beispiel des Hywind-Spar-Buoy (1 - Umformen des Grobbleches [6]; 2 - Fügen separater Bauteile [7]; 3 - Montage einzelner Sektionen [8]).....	12
Abbildung 3:	Beispielhafte Designvariation schwimmender Unterstrukturen (1 - Fertigung einer Spar-Buoy-Struktur [8]; 2 - Bau einer Semi-Submersible-Struktur im Trockendock [9]; 3 - Auszug TLP-Fertigung von GICON [10]).....	13
Abbildung 4:	Exemplarische Verformung zweier Rohrschüsse mit unterschiedlichen D/t	14
Abbildung 5:	Ausführung verschiedener Versteifungselemente (1 - Radiale Versteifungselemente innerhalb einer Hywind-Spar-Buoy-Struktur [11]; 2 - Versteifungen in Längs- und Querrichtung [12]).....	15
Abbildung 6:	Exemplarische Konservierung einer Spar-Buoy [14]	16
Abbildung 7:	Verladung und Lagerkonstruktionen für Hywind-Spar-Buoys [15]	16
Abbildung 8:	Bearbeitete Themenkomplexe im Verbundprojekt 1 „Schwimmende Unterstruktur“ innerhalb des Forschungsvorhabens.....	19
Abbildung 9:	Prozessablauf und Herausforderungen zur Fertigung einer FOWF.....	21
Abbildung 10:	Analyse lokaler Beanspruchungen beim Transport von Schüssen.....	24
Abbildung 11:	Beanspruchungsverhalten bei der Lagerung einer Spar-Buoy-Struktur in Abhängigkeit des Schalendurchmessers	25
Abbildung 12:	Schaubild der Baumethodik zur Fertigung von Radial-Versteifungen in den Grundkörper der schwimmenden Offshore Gründungsstruktur.....	29
Abbildung 13:	Hywind-Spar-Buoy und konstruktive Kopplungsstellen / Secondary-Steel-Anbauteile [17].....	30
Abbildung 14:	Konzeption einer Ablaufplan für einen Fertigungsprozess zum Einbringen von Steifen in einer Hüllstruktur	31
Abbildung 15:	Geometriespezifische Randbedingungen für automatisierte Fügeprozesse am Beispiel einer V-Naht.....	31
Abbildung 16:	Industrielle Anwendung eines Laserscanners zur messtechnischen Erfassung von Strukturen (li. [18]) und ATOS Q-Streifenlicht-Messprinzip (re. [19])	32
Abbildung 17:	3D-Robot-Vision zur Lichtbogennahtverfolgung [20]	33
Abbildung 18:	Bewertungsgrundlage für Baumethodik-Konzepte	36
Abbildung 19:	Beispiel eines Rohrsegments mit beispielhaften Kriterien zur Baumethodik-Bewertung [21].....	37
Abbildung 20:	Grundlegendes Ablaufschema der Baumethodikbewertung.....	38
Abbildung 21:	Anforderungsmatrix - Beispiel-Produktionsdetails von Floating-Strukturen (nicht-repräsentative Daten) [22]	39
Abbildung 22:	Auswahl und Vergleich von Standortfaktoren am Beispiel einer Biegemaschine/Walze [22].....	40
Abbildung 23:	Prozessablauf inkl. Konservierung im Endzusammenbau-Status.....	42
Abbildung 24:	Prozessablauf inkl. Konservierung im Endzusammenbau-Status.....	43

Abbildung 25: Verfahrensspezifische und gesetzliche Rahmenbedingungen zur Etablierung eines Beschichtungsprozesses für FOWF.....	45
Abbildung 26: Applikation von Padeyes (schraubbare Flansch-Montage) zum Transport von Kopf-Sektionen (Konstruktion und Auslegung)	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Matrix möglicher Blechdicken und Rohrdurchmesser relevanter schwimmfähiger Offshore-Strukturen mit Angabe der D/t-Verhältnisse	22
Tabelle 2:	Relevante Strukturstabilisierungsmechanismen innerhalb der Schwimmkörperfertigung	23
Tabelle 3:	Anforderungen von Versteifungen gemäß DNV [16]	27
Tabelle 4:	Auszug einer Segmentierung der zu fertigenden Struktur	37
Tabelle 5:	Zusammenfassung der Lastfälle für ein Transportmodul.....	47

Abkürzungsverzeichnis

EEW SPC	Erndtebrücker Eisenwerk Special Pipe Constructions GmbH
FEM	Finite-Elemente-Methode
FOWF	Floating-Offshore-Wind-Foundation
MP	Monopile
NSD	Neptun Ship Design GmbH
OWEA	Offshore-Wind-Energie-Enlage
SPMT	Self-Propelled-Modular-Transporter
TLP	Tension-Leg-Plattform
TRL	Technologiereifegrad (engl. Technology Readiness Level)
WDT	Neue Warnow Design & Technology GmbH
WEA	Windenergieanlage

1 Einleitung und Motivation

Mit der Gründung der EEW Special Pipe Constructions GmbH (EEW SPC) in Rostock trug die EEW-Gruppe maßgeblich zum Ausbau der Offshore-Windindustrie bei. Seit 2008 ist EEW SPC Vorreiter in der Herstellung von Monopiles, die als Gründungspfähle für Offshore-Windturbinen dienen. Mit der Fertigung von mehr als 2.100 Monopile-Gründungspfählen hat sich der Offshore-Wind-Spezialist zum Marktführer für die Produktion dieses Fundamenttyps entwickelt. In dem Rostocker Werk können dickwandige längsnahtgeschweißte Rohre mit einem Durchmesser von bis zu 12 Metern (472"), einer Länge von bis zu 120 Metern (395') und einem Stückgewicht von bis zu 2.500 Tonnen hergestellt werden.

Die Offshore Windenergietechnik ist nach derzeitigem Stand der Technik eine der effizientesten und wirtschaftlichsten Methoden der Erzeugung und Nutzung regenerativer Energieträger. Bis Ende 2020 sind etwa 1.500 Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) mit einer Gesamtkapazität von ca. 7.700 Megawatt am Netz gewesen. Gemäß den Ende 2022 definierten Ausbauzielen der Bundesregierung ist eine installierte Leistung von mindestens 30 Gigawatt bis zum Jahr 2030, respektive 70 Gigawatt bis 2045 vorgesehen. Somit wird gewährleistet, den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung auf 80 % zu steigern und anschließend kontinuierlich zu erhöhen. [1]

Die Errichtung von Offshore-Windparks ist an unterschiedliche Randbedingungen geknüpft. Neben politischen und umweltschutzrechtlichen Aspekten, welche an dieser Stelle nicht im Detail erläutert werden sollen, finden insbesondere technische, ozeanographische und geologische Randbedingungen Beachtung. Konventionelle Monopiles werden aktuell vorrangig in Küstennähe mit Wassertiefen von bis zu 60 m und geeigneten Bodenverhältnissen errichtet. Um die Ausbauziele der Offshore-Wind-Kapazität in Europa zu erreichen, ist es unabdingbar Meeresregionen mit Wassertiefen oberhalb von 60 m zu erschließen. Allein im europäischen Küstengebiet birgt dies ein enormes Installationspotenzial von bis zu 80 % der verfügbaren geographischen Ausbaustandorte. [2]

Technologien für schwimmende Offshore Windparks werden als wesentliche Triebfeder für die Entwicklung der Offshore-Wind-Industrie mit globaler Ausstrahlung angesehen. In Konsequenz dessen wird zukünftig ein neuer internationaler Markt für schwimmende Offshore-Wind-Technologien entstehen, um die oben formulierten Energiewendeziele umzusetzen. Bis zu diesem Zeitpunkt müssen schwimmende Unterstrukturen einen Technologiereifegrad (TRL) von TRL-9 erreicht haben, um diesen Markt bedienen zu können.

Die drei aktuell bevorzugten Strukturkonzepte für Floating-Offshore-Wind-Foundations (FOWF) sind der s.g. Spar-Buoy, die Semi-Submersible-Structure und die Tension-Leg-Plattform (TLP). Die in der untenstehenden Abbildung 1 visualisierten Konzepte sind teilweise aus der Offshore-Öl- und Gasindustrie übernommen worden (betrifft Spar-Buoy und Tension-Leg-Plattform-Konzept). Aufgrund der stark abweichenden Anforderungen an die Konstruktion im Vergleich zur Offshore-Windindustrie sind strukturelle Anpassungen erforderlich, was mit erheblichen Entwicklungsaufwendungen einhergeht. [3]



Abbildung 1: Konzepte für schwimmende Unterstrukturen [4]

Zwar sind ausgewählte Prototypen der jeweiligen Strukturkonzepte für FOWF bereits in der Testphase, sie konnten aber im Hinblick auf die Großserienfertigung bislang noch keine Industriereife erlangen. Dies ist vornehmlich auf Nachteile in den Bereichen Fertigung, Transport, Beschichtung und Installation zurückzuführen, welche sowohl aus den jeweiligen Strukturdesigns als auch aus dem Ausreizen klassischer Monopiles resultieren. Die angesprochenen Bereiche bildeten daher auch die Basis für die in dem Vorhaben berücksichtigten Forschungsschwerpunkte.

Nach derzeitigem Stand der Technik erfolgt das Design der jeweiligen Unterstrukturen individuell, projektspezifisch und belastungsoptimiert. Dies gilt sowohl für Primary- (Auftriebskörper, Verbindungselemente, Verankerung etc.) als auch für Secondary-Steel-Komponenten. Infolge der Individualität ergeben sich lange Fertigungszeiten und somit hohe Fertigungskosten. Überdies können Produktionsunternehmen ihre Fertigungstechnologien und -prozesse nicht auf das jeweilige Produkt abstimmen und optimieren, was wiederum zu einem überwiegenden Anteil manueller Fertigungsprozesse führt. Gleiches lässt sich ebenfalls auf die Bereiche Transport und Installation schwimmender FOWEA übertragen.

In Konsequenz der umrissenen Sachverhalte war es das Ziel des Verbundprojekts, innovative Design-, Fertigungs- und Planungstechnologien zu entwickeln, welche unterstrukturtypübergreifend bei der Entwicklung, Produktion und Installation Anwendung finden können und nach

ihrem Grundprinzip eine Serienfertigung zulassen. Unter dem Aspekt einer maximalen Standardisierung von Baugruppen und Komponenten schwimmender Unterstrukturen sollen sowohl Fertigungs- und Handlingtechnologien, als auch die gesamte Planung des Aufbaus und der Steuerung von Fertigungsstätten und Logistikprozessen entwickelt werden. Dies stellt die Basis für eine optimierte bedarfsgerechte Bereitstellung des Endprodukts „schwimmende Unterstruktur“ für den Endkunden dar.

Innerhalb des vorliegenden Abschlussberichts werden Teilergebnisse des Vorhabens vorgestellt, an denen EEW SPC maßgeblich involviert war. Weitere Projekterkenntnisse sind in den von den Projektpartnern verfassten Abschlussberichten zu entnehmen. Aufgrund der Tatsache, dass diverse Untersuchungen und Entwicklungen der Geheimhaltung unterliegen, werden nicht alle Forschungsergebnisse lückenlos ausgeführt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Schwimmende Unterstrukturen bergen ein enormes Potenzial für die globale Energieversorgung. Hervorzuheben sind hier insbesondere Länder und Regionen, deren Küsten ausschließlich durch Tiefwasserregionen geprägt sind. Zu letztgenannten Gebieten zählen beispielsweise die europäische Atlantikküste, sämtliche Küsten der japanischen Inseln sowie die Ost- und Westküste der USA. Ferner könnten schwimmende Windparks eine alternative Energiequelle für geografisch isolierte Inseln oder Öl- und Gasplattformen sein. [5]

2.1 Bauweisen schwimmender Offshore-Gründungsstrukturen

Vor diesem Hintergrund wurden in den vergangenen fünfzehn Jahren verschiedene Konzepte schwimmender Unterstrukturen entwickelt, die sich in die bereits vorgestellten Unterstrukturtypen Spar-Buoy, Semi-Submersible und Tension-Leg-Plattform kategorisieren lassen. Mit dem Projekt Hywind, in dem exemplarisch die Spar-Buoy-Struktur als Gründungsstruktur verwendet worden ist, konnten bereits erste Erfahrungen, auch hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit gesammelt werden. Die hierbei berücksichtigten Methoden für die Fertigung werden nachfolgend im Stand der Wissenschaft und Technik für die Fertigung schwimmenden Offshore Gründungsstrukturen zusammengetragen. Darauf aufbauend werden im Anschluss weitere Technologien erörtert, die dazu beitragen können, eine effiziente und wirtschaftliche Fertigung dieser Strukturen zu ermöglichen. Eine tiefgründige Analyse weiterer Randbedingungen erfolgt im Ergebnisteil, woraufhin Konzepte zur Fertigung FOWF folgen.

Zu den grundlegenden Fertigungsschritten für die Herstellung von schwimmenden Unterstrukturen zählen derzeit:

- Präparation der Grobbleche und Schweißen einzelner Platten
- Umformung der Grobbleche
- Fügen von Einzelbauteilen zu Sektionen
- Einbau von Steifen oder sonstigen Secondary-Steel-Komponenten
- Fügen von Sektionen zur Global-Strukturen
- Transport und Lagerung
- Beschichtung

Am Beispiel des vom Navantia-Windar-Konsortium für den 30 MW-Windpark Hywind Scotland gebauten Spar-Buoys lassen sich einzelne Fertigungsprozessschritte näher visualisieren (siehe Abbildung 2). Hierbei wurden insgesamt fünf schwimmende Gründungsstrukturen mit einem Durchmesser von ca. 14 m bei Wandstärken von ca. 60 mm im Bereich der zylindrischen Hüllstruktur gefertigt.

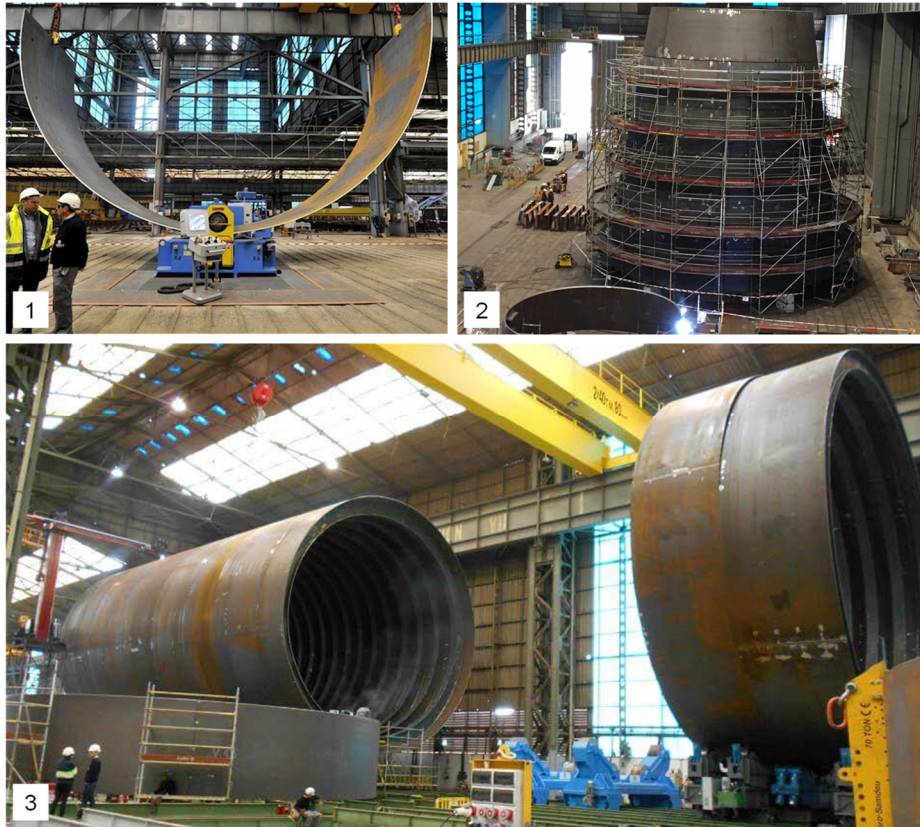


Abbildung 2: Exemplarische Fertigungstechnologien für FOWF am Beispiel des Hywind-Spar-Buoy (1 - Umformen des Grobbleches [6]; 2 - Fügen separater Bauteile [7]; 3 - Montage einzelner Sektionen [8])

Resümiert man die aktuelle Fertigungssituation schwimmender Unterstrukturen, so lässt sich feststellen, dass diese derzeit belastungsoptimiert und damit standortspezifisch ausgelegt werden. Ebendies wirkt sich unmittelbar auf das Design und somit auf die Herstellung schwimmender Unterstrukturen aus. Andererseits werden nach derzeitigem Stand der Technik fast ausschließlich Fertigungsgrundlagen des Schiffbaus angewendet. Letzteres beeinflusst nicht nur die Baumethodik, sondern auch den Fertigungsstandort schwimmender Unterstrukturen.

Die eingangs erwähnte Individualität des Unterstrukturdesigns ist in Abbildung 3 exemplarisch dargestellt. Teilbild 1 veranschaulicht die Fertigung einer Spar-Buoy-Struktur in Horizontalbauweise. Vorgefertigte Einzelsektionen werden mittels Rundnähten zu einem rotationssymmetrischen Grundkörper zusammengesetzt. In Abhängigkeit logistischer Randbedingungen, wie etwa Platzbedarfe oder Krankapazitäten, wird die komplette Primärstruktur des Spar-Buoy oder Großsektionen derselben in der Fertigungshalle zusammengebaut.

Dementgegen bedingt die Vertikalbauweise einer Semi-Submersible-Struktur, wie in Teilbild 2 illustriert, Trockendocks oder nach oben weiträumigere Fertigungsstätten. Ferner sind entsprechend hohe Krane, Baugerüste u. Ä. notwendig. In Analogie zur Herstellung von Spar-Buoys, wird die schwimmende Unterstruktur auch in diesem Fall in Sektionsbauweise gefertigt. [9]

Im Gegensatz zu den rotationssymmetrischen Sektionen der beiden zuvor erwähnten Unterstrukturtypen illustriert Teilbild 3 eine quaderförmige Struktur, welche Bestandteil einer TLP ist. Ebendiese Strukturteile können, anders als in den oben geschilderten Fertigungssituationen, nicht auf Drehvorrichtungen hergestellt und bearbeitet werden. Darüber hinaus sind alternative Fertigungskonzepte notwendig.



Abbildung 3: Beispielhafte Designvariation schwimmender Unterstrukturen (1 - Fertigung einer Spar-Buoy-Struktur [8]; 2 - Bau einer Semi-Submersible-Struktur im Trockendock [9]; 3 - Auszug TLP-Fertigung von GICON [10])

2.2 Design und Fertigungskriterien

Für alle Unterstrukturtypen, feststehend eingeschlossen, gilt die sogenannte strukturelle Integrität als zentraler Einflussfaktor auf die Baumethodik. Mit Bezug auf Spar-Buoys, Semi-Submersible-Strukturen oder Monopiles ist hiermit beispielsweise der Widerstand gegen Eigenversagen von rotationssymmetrischen Hüllkörpern gemeint (Stabilität und Festigkeit). Die strukturelle Integrität wird maßgeblich durch die Masse, den Durchmesser, der Wanddicke und der Materialgüte der Struktur beeinflusst. Ein erstes Indiz für die Fertigung gibt das s. g. D/t -Verhältnis an, welches die Verformbarkeit eines mit der Rotationsachse horizontal positionierten Zylinders charakterisiert.

Beispielgebend für die beleuchtete Relation verdeutlicht Abbildung 4 die Verformung eines Einzelschusses in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisses. Während links ein Schuss mit einem D/t von 200 eine maßgebliche Deformation um 624 mm infolge der Schwerkraft aufweist, zeigt der Schuss in der Darstellung rechts ($D/t = 140$) lediglich eine Deformation von 155 mm.

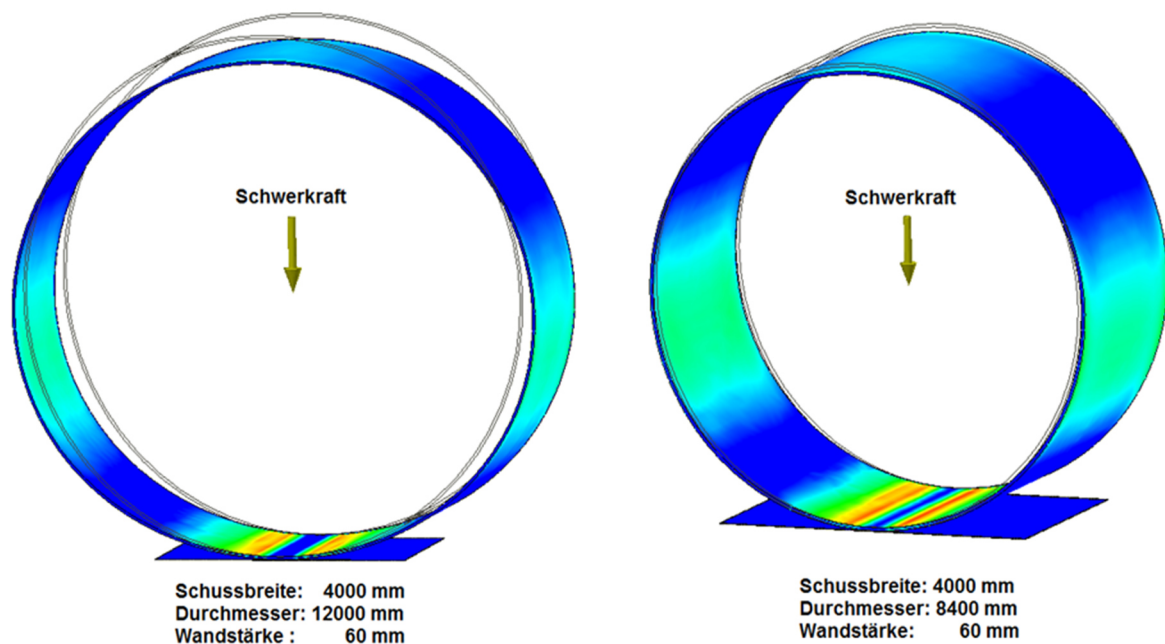


Abbildung 4: Exemplarische Verformung zweier Rohrschüsse mit unterschiedlichen D/t

Vor dem Hintergrund der vorig erörterten Zusammenhänge werden in derzeitigen schwimmenden Unterstrukturen unterschiedliche Versteifungselemente verbaut. In Analogie zum Grunddesign der Hüllstruktur werden beispielsweise Form, Anzahl und Einbauposition der Versteifungen projektspezifisch festgelegt. Dem folgend ist es für Hersteller schwimmender Unterstrukturen nach aktuellem Wissenstand nicht möglich, eine einheitliche optimierte Baumeethodik anzuwenden. Vielmehr können aufgrund fehlender Fertigungsstandards produktionsspezifische Randbedingungen, wie etwa Anlagenkapazitäten nicht optimiert werden. Ebendies korreliert mit bislang ausstehenden Technologieentwicklungen für den Bau schwimmender Unterstrukturen.

Vorbenanntes Entwicklungsdefizit ist auf Verbindungstechnologien für Versteifungselemente in Auftriebskörpern und sekundären Stahlkomponenten schwimmender Unterstrukturen übertragbar. Bedingt durch zum Beispiel variierende Nahtvorbereitungen, Werkstoffgüten, Schweißpositionen und Anzahl an Fügeverbindungen ist bis dato keine Standardisierung und damit Automatisierung der Verbindungstechnologie möglich. Beispielgebend für den aktuellen Stand der Technik visualisiert Abbildung 5 die Ausführung unterschiedlicher Versteifungselemente.

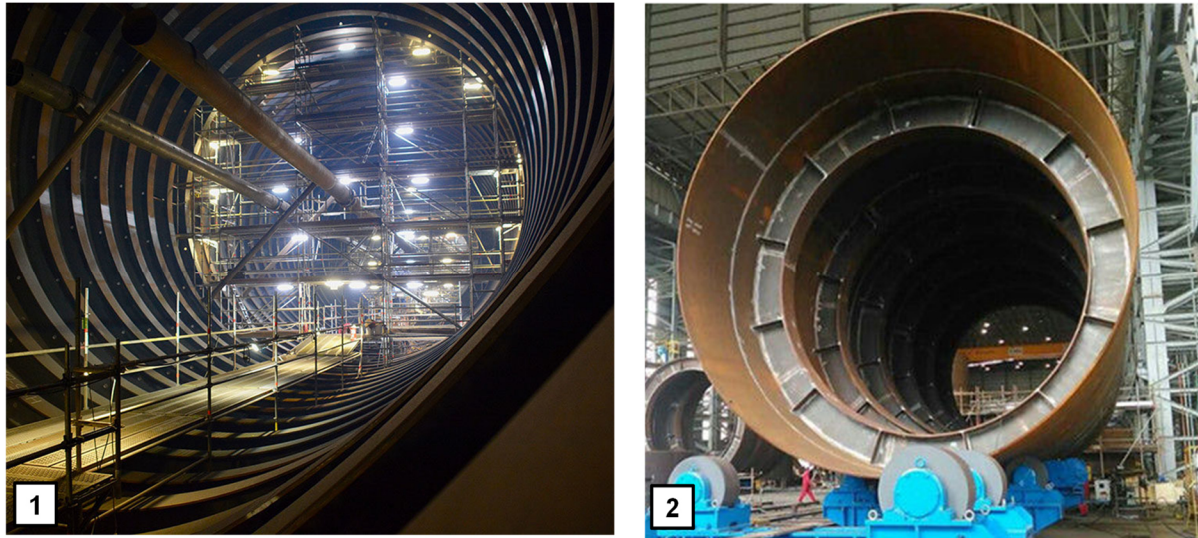


Abbildung 5: Ausführung verschiedener Verstärkungselemente (1 - Radiale Verstärkungselemente innerhalb einer Hywind-Spar-Buoy-Struktur [11]; 2 - Verstärkungen in Längs- und Querrichtung [12])

2.3 Beschichtungstechnologien

Sowohl bei feststehenden als auch bei schwimmenden Unterstrukturen folgt die Konservierung bzw. Beschichtung nach der Fertigung der Primärstruktur derselben, um einen Schutz gegenüber Korrosion zu ermöglichen. Aktuell werden nahezu alle Bereiche feststehender Unterstrukturen, die dauerhaft von korrosivem Meerwasser umgeben sind, beschichtet. In Übereinstimmung damit zeigt die Literaturrecherche, dass schwimmende Unterstrukturen vollständig konserviert werden. Im Gegensatz zu feststehenden Unterstrukturen, wie z. B. Monopiles, werden schwimmende Unterstrukturen i.d.R. in Sektionsweise beschichtet. Ebendies postuliert die eingangs erwähnte Übereinstimmung mit schiffbaulichen Fertigungsmethoden.

Die grundsätzliche Konservierung schwimmender Unterstrukturen soll im Nachfolgenden am Beispiel einer Spar-Buoy expliziert werden. Gemäß [13] besteht eine Hywind-Spar-Buoy aus fünf Großsektionen mit einer Einzelmasse von rund 800 t. Jede Großsektion wird nicht nur von innen, sondern auch von außen vollständig mithilfe konventioneller Beschichtungsverfahren konserviert. Hierbei werden sowohl Sektionsstöße, also Übergangsbereiche zur Nachbarsektion, als auch Anschlussbereiche für sekundäre Anbauteile vorerst nicht beschichtet (vgl. Abbildung 6). Erst nachdem alle Sektionen und Anbauteile der schwimmenden Unterstruktur miteinander verbunden wurden, folgt die finale Konservierung der restlichen Strukturoberflächen.

Neben zusätzlich notwendigen Transporten der Großsektionen und dem damit verbundenen Zeitaufwand, zählt vor allem die Unterbrechung der Bauabfolge zu den zentralen Nachteilen der bisherigen Konservierungsprozedur. Überdies sind zusätzliche Lagerflächen bei jener Verfahrensweise unerlässlich.



Abbildung 6: Exemplarische Konservierung einer Spar-Buoy [14]

2.4 Handling und Transport

Analysiert man aktuelle Transport-, Logistik und Verlademethoden schwimmender Unterstrukturen, so ist festzustellen, dass Individuallösungen in Abhängigkeit des Strukturdesigns essenziell sind. So sind zum einen entsprechende Transportmittel, wie Krane oder modulare Schwerlastkombinationsfahrzeuge zum innerbetrieblichen Transport notwendig (vgl. Abbildung 7 oben), zum anderen müssen Hersteller schwimmender Unterstrukturen vor dem Hintergrund beschriebener kritischer Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisse spezielle Methoden und Konstruktionen zur Lagerung der projektspezifischen Hüllstruktur bereitstellen (vgl. Abbildung 7 unten).



Abbildung 7: Verladung und Lagerkonstruktionen für Hywind-Spar-Buoys [15]

Unter Berufung auf den aktuellen Stand der Technik ist zu resümieren, dass die standortspezifische Auslegung schwimmender Unterstrukturen direkten Einfluss auf die Fertigung jener Stahlkonstruktionen hat. Aufgrund fehlender Designstandards sind strukturoptimierte Fertigungstechnologien bis dato nicht entwickelt worden. Indes nutzt die Industrie vorhandene Methoden die sich im Wesentlichen an schiffbaulichen Fertigungsverfahren orientieren.

3 Methodisches Vorgehen

Um die in den vorherigen Abschnitten angesprochenen Technologie-Defizite so umfassend wie möglich berücksichtigen zu können, wurde innerhalb des Vorhabens eine thematische Trennung in insgesamt vier Themenkomplexe vorgenommen, die in dem nachfolgenden Schema in Abbildung 8 gelistet sind. Die Nummerierung der Themenkomplexe orientiert sich dabei an die im Vorhaben definierte Globalgliederung des Verbundprojekts 1. Den umfassendsten Anteil hat das **Themenkomplex 2** eingenommen, dass eine Detaillierung der Technologien für die Fertigung unterstrukturtypenunabhängiger Auftriebskörper und Systemkomponenten beinhaltet. Darauf anschließend folgten Themenstellungen für Planungstechnologien global vernetzter Wertschöpfungsprozesse (**Themenkomplex 3**), fertigungsintegrierte Beschichtungstechnologien mit Aspekten der Gesundheit, Sicherheit und Umwelt (**Themenkomplex 4**) sowie universelle Transport- und Handhabungstechnologien (**Themenkomplex 5**), die bei der Fertigung von FOWF ebenfalls von maßgeblicher Bedeutung sind.

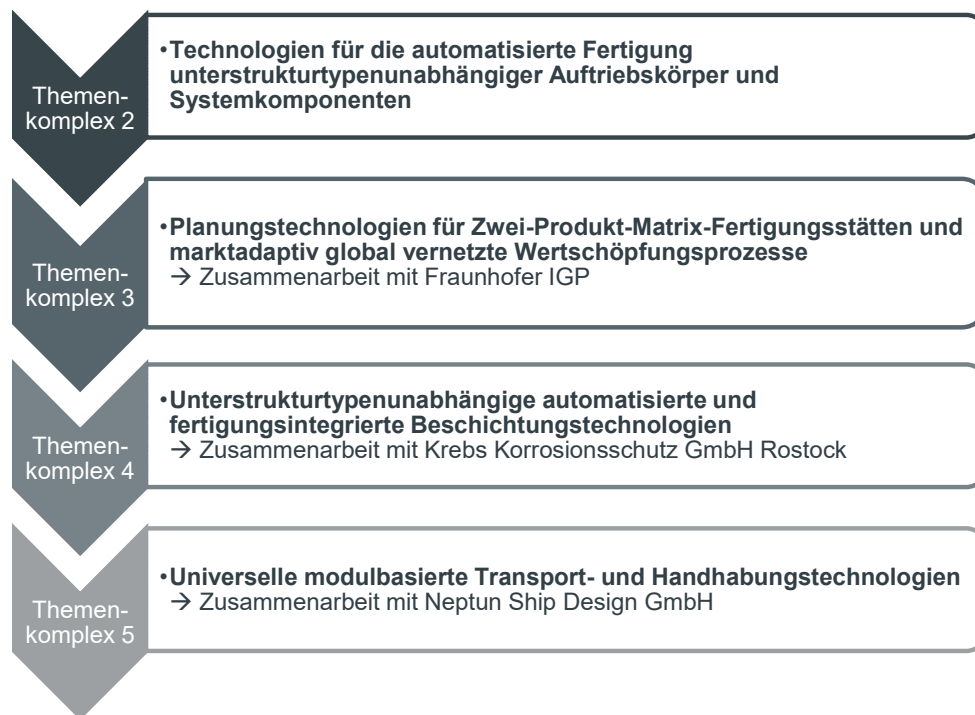


Abbildung 8: Bearbeitete Themenkomplexe im Verbundprojekt 1 „Schwimmende Unterstruktur“ innerhalb des Forschungsvorhabens

Aufgrund den komplexen Wirkzusammenhängen, die bei den betrachteten Themenstellungen resultierten, erfolgte innerhalb des Vorhabens eine enge Zusammenarbeit mit regionalen Projektpartnern aus Industrie und Forschung, die in ihren jeweiligen Bereichen ein breites Wissensspektrum aufweisen. Die jeweiligen Partner sind ebenfalls in Abbildung 8 genannt.

4 Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Projektergebnisse vorgestellt. Hierbei wird das in Abbildung 8 adressierte methodische Vorgehen als Gliederung innerhalb der nachfolgenden Abschnitte aufgegriffen.

4.1 Technologien für die Fertigung unterstrukturtypenunabhängiger Auftriebskörper und Systemkomponenten

Das Ziel des vorliegenden Themenkomplexes war es Technologien und Methoden für die Fertigung von schwimmenden Unterstrukturen für FOWF unter dem Kernaspekt der Automatisierung und Digitalisierung von Arbeitsprozessen zu entwickeln. Besonderer Fokus wurde hierbei auf die Strukturelle Integrität während der Bauteilfertigung gelegt, die in umfassende Studien und Entwicklungen geeigneter Betriebsmittel resultierte.

4.1.1 Sicherstellung der strukturellen Integrität

Im ersten Arbeitspaket des TK2 wurden Technologien zur Gewährleistung der strukturellen Integrität der unterstrukturunabhängigen Auftriebskörperdesigns in variierenden Fertigungsschritten (vgl. Abbildung 9) erarbeitet.



Abbildung 9: Prozessablauf und Herausforderungen zur Fertigung einer FOWF

Als Eingangsgrößen wurden die infolge der Hauptbemessungskenngrößen einer FOWF resultierenden geometrischen Eigenschaften, wie den vorhandenen Blechdicken t , Durchmessern D sowie Abmessungen der Sektionen und Baugruppen der Schwimmkörper gemäß dem aktuellen Stand der Technik analysiert. Die Eingangsdaten erfolgten sowohl durch Eigen-

recherchen durch EEW SPC als auch durch die bilaterale Zusammenarbeit mit den im Konsortium befindlichen Unternehmen Neptun Ship Design GmbH (NSD) und Neue Warnow Design & Technologie GmbH (WDT).

Eine Übersicht möglicher D/t-Verhältnisse ist der nachfolgenden Tabelle 1 überblickhaft zu entnehmen. Grundsätzlich ist zu konstatieren, dass das Verhältnis des Durchmessers zur Blechdicke mit den Herausforderungen in den Fertigungsschritten zur Strukturstabilisierung korreliert. Während im Anschlussbereich zum Turm der Windkraftanlage Durchmesser von bis zu 8 m Stand der Technik sind, können im unteren Bereich, z. B. einer Spar-Buoys-Struktur, Durchmesser von mehr als 14 m nicht ausgeschlossen werden. Die hierbei resultierenden D/t-Verhältnisse erreichen in diesem Bereich die höchsten Werte und generieren somit die höchsten Herausforderungen im Sinne der Fertigbarkeit.

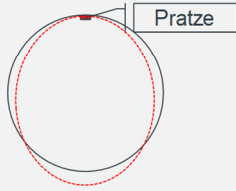
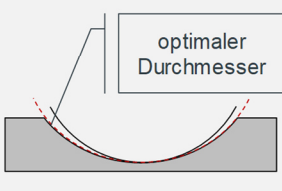
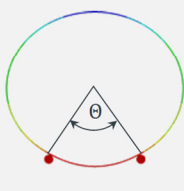
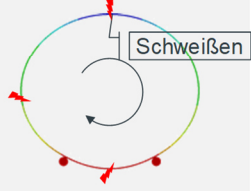
Tabelle 1: Matrix möglicher Blechdicken und Rohrdurchmesser relevanter schwimmfähiger Offshore-Strukturen mit Angabe der D/t-Verhältnisse

		Durchmesser in mm												
	S355	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500	14000
Blechdicke in mm	50	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280
	55	145	155	164	173	182	191	200	209	218	227	236	245	255
	60	133	142	150	158	167	175	183	192	200	208	217	225	233
	65	123	131	138	146	154	162	169	177	185	192	200	208	215
	70	114	121	129	136	143	150	157	164	171	179	186	193	200
	75	107	113	120	127	133	140	147	153	160	167	173	180	187
	80	100	106	113	119	125	131	137	143	150	156	163	169	175
	85	94	100	106	112	118	124	129	135	141	147	153	159	165
	90	89	94	100	106	111	117	122	128	133	139	144	150	156
	95	84	89	95	100	105	111	116	121	126	132	137	142	147
	100	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
	105	76	81	86	90	95	100	105	110	114	119	124	129	133
	110	73	77	82	86	91	95	100	105	109	114	118	123	127
	115	70	74	78	83	87	91	96	100	104	109	113	117	122

Mit den ermittelten geometrischen Randbedingungen sowie den belastungsspezifischen Faktoren erfolgte im Anschluss eine umfassende Technologieentwicklung in den Bereichen (vgl. Tabelle 2):

- Heben und Verbringen von einzelnen Schüssen und Sektionen
- Zwischenablage und Lagerung der Strukturen
- Sektions- und Endzusammenbau auf Drehvorrichtungen
- Bauteilhandling-Operationen (Drehen, Justieren und Bauteilbearbeitung)

Tabelle 2: Relevante Strukturstabilisierungsmechanismen innerhalb der Schwimmkörperfertigung

Heben und Verbringen von Segmenten	Zwischenstation / -ablage	Ablegen von Bauteilen auf Bearbeitungszentren	Drehen, Justieren und Bauteilbearbeitung
			

Innerhalb dieser Teilbereiche erfolgten jeweils technologische Entwicklungen in den verschiedenen Projektphasen der Analyse, Konzeption, Entwicklung und Integration, auf die nachfolgend zusammenfassend eingegangen wird:

Das **Heben und Verbringen von Segmenten**, s. g. Schüsse, die im Allgemeinen eine maximale Breite von wenigen Metern aufweisen, ist ein essenzieller Bestandteil in der frühen Phase der FOWF-Fertigung. Hierfür erfolgte sowohl eine nähere Betrachtung der Beanspruchungszustände in den längsgeschweißten Nähten im Schuss, als auch an den Kontaktstellen zwischen der Pratze und dem Schuss. Mittels Finite-Elemente (FE)-Simulationen konnten Überbeanspruchungen identifiziert werden, sodass neue Technologien für den Transport von Schüssen erarbeitet werden mussten. Als zielführend hat sich nach diversen Vorstudien und konzeptionellen Ausarbeitungen eine Mehr-Punkt-Auflage herausgestellt, die neben einer größeren Kontaktfläche eine verbesserte Strukturstabilisierung erzielt. Dies resultierte aus einer Verringerung der Schuss-Ovalisierung beim Heben und Verbringen der Bauteile. Sämtliche Ergebnisse wurden durch umfassende computergestützte Berechnungsoperationen verifiziert, wie sie exemplarisch in der nachfolgenden Abbildung 10 visualisiert sind. Die Berechnungen und Studien haben maßgeblich zur Bewertung der Hebemittel und Traversen beigetragen.

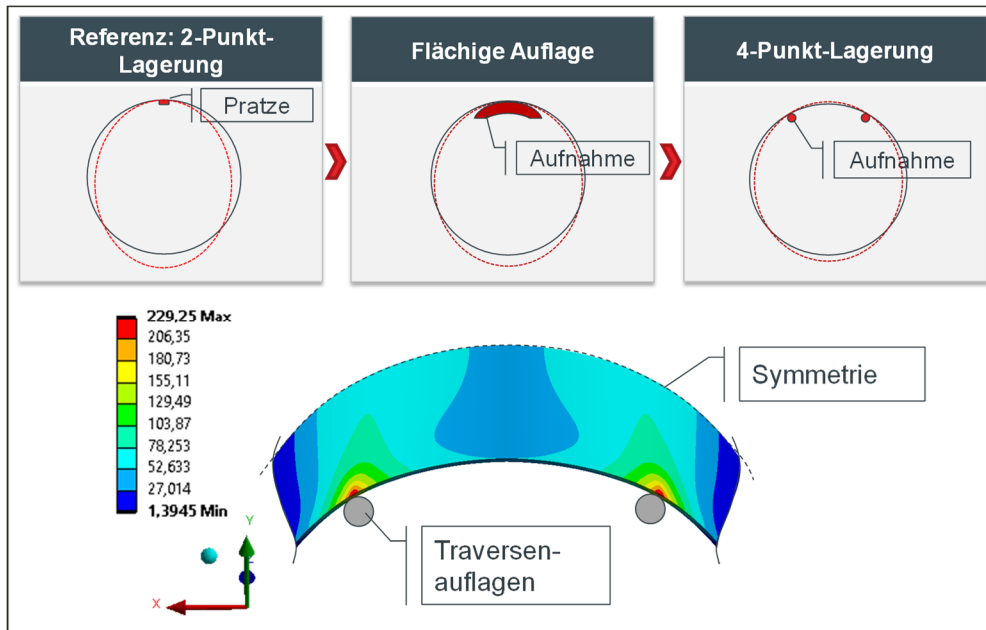


Abbildung 10: Analyse lokaler Beanspruchungen beim Transport von Schüssen

Die entwickelten Traversen und Anschlagmittel wurden im weiteren Verlauf der Bearbeitung analysiert und optimiert, um ein möglichst großes Einsatzspektrum bei den oben geschilderten Durchmesser- und Blechdickenvariationen zu ermöglichen. Mit den durchgeführten Analysen konnte sichergestellt werden, dass bei Durchmessern von bis zu 15 m ein zulässiges Deformations- und Beanspruchungsverhalten auch bei geringer Wanddicke erfolgt.

Die erzielten Ergebnisse zur **Lagerung der äußeren Hüllstruktur** auf dem Boden, auf Rollenböcken oder in Lagerschalen werden nachfolgend vorgestellt. Innerhalb des Vorhabens konnte eine teilautomatisierte Auswertestrategie erarbeitet werden, die eine effiziente und zudem nachhaltige Vorplanung zur Lagerung von Einzelschüssen oder Baugruppen ermöglicht. Als Eingangsparameter dienten hierfür die aus Bauteillisten oder Baugruppenzeichnungen zu entnehmenden Abmessungen sowie Materialrandbedingungen. Über das Auslesen in die Berechnungs- und Auswerteroutine wurde ein geeigneter Workflow erarbeitet, der für die Beanspruchungsanalyse und der Berechnung einer zulässigen Lagerposition und einem Toleranzbereich für Lagerschalendurchmesser herangezogen werden konnte. Exemplarisch wurde in der nachfolgenden Abbildung 11 für die Lagerung einer Sektion mit einem Durchmesser von 10.000 mm die Beanspruchung über die Durchmesservariation der Lagerschale aufgetragen. Es ist zu entnehmen, dass durch Variation der Lagerschale eine Optimierung der Beanspruchung an der Grundstruktur des Floaters erfolgen kann. Dies bietet somit enormes Potenzial zur Gewährleistung der strukturellen Integrität in Anbetracht der beschriebenen Strukturdimensionen.

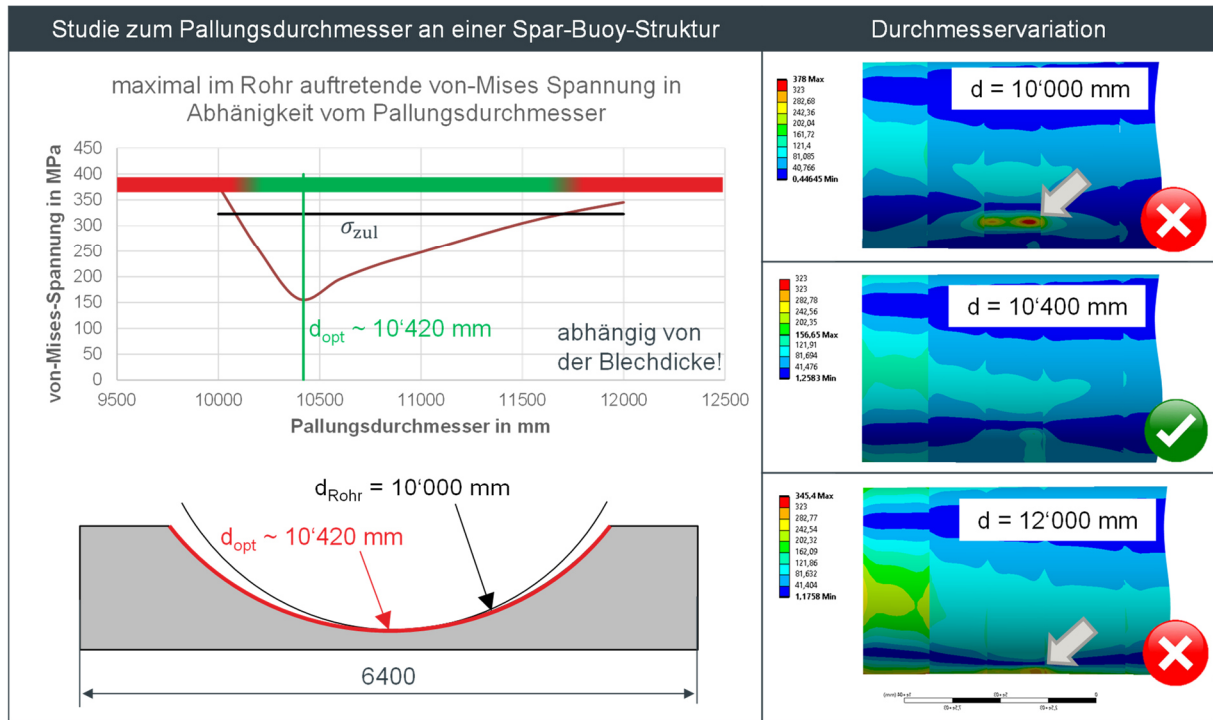


Abbildung 11: Beanspruchungsverhalten bei der Lagerung einer Spar-Buoy-Struktur in Abhängigkeit des Schalendurchmessers

Die **Ablage auf Drehvorrichtungen** bspw. für das Schweißen von Rundnähten, das Nachbearbeiten der Nähte und der zerstörungsfreien Prüfung der Schweißnähte ist für die Fertigung von FOWF ebenfalls von maßgeblicher Bedeutung. Dies kann anhand der Fertigung der Hywind-Sparbuoys Abbildung 5 (re.) bestätigt werden. Zum Start der Ausarbeitungen wurden die Herausforderungen der Drehvorrichtungen analysiert. Insbesondere das hohe Strukturgewicht der vergleichsweise nachgiebigen Bauteile (hohes D/t) resultierte unter Berücksichtigung der lokalen Kontaktpunkte der Stahl- oder beschichteten Rollen auf der Grundstruktur der FOWF maßgebliche Beanspruchungen. Es konnten auf Basis weiterer Analysen bleibende plastische Dehnungen im Material nachgewiesen werden, die es im Hinblick auf die Strukturdimensionierung für den Betrieb zu vermeiden galt. Als Resultat der Technologieentwicklung konnte innerhalb des Vorhabens eine neuartige Drehvorrichtung für eine bauteil- und lastoptimierte Lagerung entwickelt werden. Neben der Gestaltung der Drehvorrichtung, die letztlich zu einer Patentanmeldung geführt hat, wurden diverse Einflüsse auf die Beanspruchungen im Kontaktbereich investigativ betrachtet. Hierzu zählten:

- Untersuchung des Einflusses des Rollenabstands
- Analyse der Rollengeometrie auf lokale Kontaktspannungen
- Einfluss des Rollen-Öffnungswinkels
- Einfluss der Rollenkonfigurationen (Einfach-Rolle; Doppelwippe; verkettete Rollenkonfigurationen)
- Doppelwippenkonfiguration und Detailoptimierung

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der Projektergebnisse wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

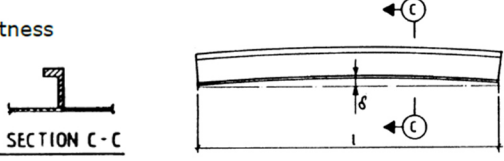
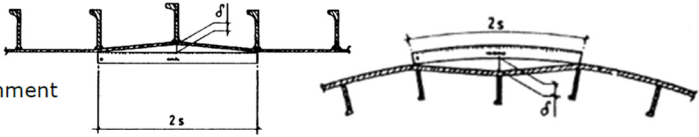
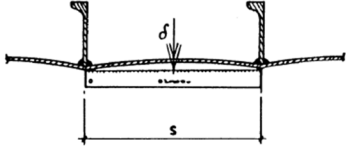
4.1.2 Standardisierung von Versteifungselementen

In den unterschiedlichen Projektphasen konnte das Projektkonsortium identifizieren, dass infolge der dünnwandigen Strukturen und den im Vergleich zu konventionellen Monopiles gesteigerten Durchmessern der schwimmenden Unterstrukturen Versteifungselemente Berücksichtigung finden müssen. Sie ermöglichen die strukturelle Integrität der schwimmenden Offshore-Gründungsstrukturen im Betrieb. Die ersten Analysen innerhalb des Vorhabens erfolgten daher hinsichtlich grundlegender Randbedingungen von Versteifungselementen in FOWF. Es wurden mögliche Profiltypen auf Basis von Regelwerken und Normen identifiziert und in einem Katalog gelistet. Eine Auswahl relevanter Normen ist nachfolgend vorgestellt:

- DIN EN 10055 - Warmgewalzter gleichschenkliger T-Stahl mit gerundeten Kanten und Übergängen
- DIN 1025-1 - Warmgewalzte schmale I-Träger mit geneigten Flanschflächen
- DIN 1025-2 - Warmgewalzte breite I-Träger mit parallelen Flanschflächen
- DIN 1025-3 - Warmgewalzte breite I-Träger, leichte Ausführung (IPBI-Reihe)
- DIN 1025-4 - Warmgewalzte breite I-Träger verstärkte Ausführung (IPBv-Reihe)
- DIN 1025-5 - Warmgewalzte mittelbreite I-Träger (IPE-Reihe)
- DIN 1026-1 - Warmgewalzter U-Profilstahl mit geneigten Flanschflächen
- DIN 1026-2 - Warmgewalzter U-Profilstahl mit parallelen Flanschflächen
- DIN EN 10056-1 – Gleichschenklige und ungleichschenklige Winkel aus Stahl
- DIN EN 10067 - Warmgewalzter Wulstflachstahl
- DIN 1027 - Warmgewalzter rundkantiger Z-Stahl

Die Kenntnisse der Profiltypen wurden anschließend mit den strukturtypenbezogenen Anforderungen für Spar-Buoys, Semi-Submersible-Strukturen und TLP in Einklang gebracht. Aufgrund der unterschiedlichen Geometrieformen und Funktionsprinzipien der Unterstrukturen resultierten variierende Beanspruchungen und damit auch unterschiedliche Restriktionen für die zu implementierenden Steifen. Wesentliche normative Anforderungen an Versteifungen gemäß DNV sind nachfolgend in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Anforderungen von Versteifungen gemäß DNV [16]

Bemes- sungs- kriterien	DNV-GL-OS-C401 - Fabrication and testing of offshore structures DIN EN 1090-2:2018-09 - Ausführung von Stahltragwerken, Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken EEMUA 158: 2014 - Construction Specification for Fixed Offshore Structures																															
Werk- stoffe	Warmgewalzte T-Profilstangen gemäß DIN EN 10025; z. B. in S235JR/S355JR																															
Toleranz	Grenzabmaße und Formtoleranzen der Profile gelten nach DIN EN 10034; Form- und Lagetoleranzen sind gemäß DIN ISO 2768-2 (Allgemeintoleranzen - Toleranzklassen) und DIN EN ISO 1101 (Geometrische Produktspezifikation - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf) und ISO 13920:1996-08 (Schweißen - Allgemeintoleranzen für Schweißkonstruktionen - Längen und Winkelmaße, Form und Lage und DNV-GL-OS-C401 - Fabrication and testing of offshore structures																															
Toleranz (2)	Max. out of straightness $\delta = 0.0015 /$ 																															
Toleranz (3)	Max. misalignment $\delta = 0.02 s$ 																															
Toleranz (4)	Max. out of plane displacement $\delta = 0.005 s$ 																															
Prüfung	DNV-GL-OS-C401 - Fabrication and testing of offshore structures: "Bei ausgesteiften Blechen, die nicht als Sonderbauart klassifiziert sind, darf die Schweißverbindung zwischen Steife und Träger bzw. zwischen Trägersteg und Platte normalerweise der Strukturkategorie sekundär zugeordnet werden." Prüfkategorie III, solange keine besondere Klassifizierung für Kategorie I gefordert ist																															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Structural category</th><th rowspan="2">Inspection category</th><th rowspan="2">Type of connection</th><th rowspan="2">Visual testing</th><th colspan="3">Test method</th></tr> <tr> <th>Magnetic¹⁾</th><th>Radiography²⁾</th><th>Ultrasonic³⁾</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">Secondary</td><td rowspan="3">III</td><td>Butt weld</td><td>100%</td><td>Spot⁵⁾</td><td>Spot⁵⁾</td><td>-</td></tr> <tr> <td>Cross- and T-joints, full penetration welds</td><td>100%</td><td>Spot⁵⁾</td><td>-</td><td>Spot⁵⁾</td></tr> <tr> <td>Cross- and T-joints, partly penetration and fillet welds</td><td>100%</td><td>Spot⁵⁾</td><td>-</td><td>-</td></tr> </tbody> </table> <p> 1) -PT to be adopted for non ferro-magnetic materials and duplex (ferritic-austenitic) steels. 2) RT may be partly or wholly replaced by UT upon agreement. 3) UT shall be carried out for plate thicknesses of 10 mm and above. Testing of thicknesses $8 \leq t < 10$ mm may be agreed if special qualification is carried out. 4) For weld connections on hull shell not subjected to high residual stress, spot check will be accepted as sufficient. 5) Approximately 2% to 5%. </p>						Structural category	Inspection category	Type of connection	Visual testing	Test method			Magnetic ¹⁾	Radiography ²⁾	Ultrasonic ³⁾	Secondary	III	Butt weld	100%	Spot ⁵⁾	Spot ⁵⁾	-	Cross- and T-joints, full penetration welds	100%	Spot ⁵⁾	-	Spot ⁵⁾	Cross- and T-joints, partly penetration and fillet welds	100%	Spot ⁵⁾	-
Structural category	Inspection category	Type of connection	Visual testing	Test method																												
				Magnetic ¹⁾	Radiography ²⁾	Ultrasonic ³⁾																										
Secondary	III	Butt weld	100%	Spot ⁵⁾	Spot ⁵⁾	-																										
		Cross- and T-joints, full penetration welds	100%	Spot ⁵⁾	-	Spot ⁵⁾																										
		Cross- and T-joints, partly penetration and fillet welds	100%	Spot ⁵⁾	-	-																										

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde auf Basis der vorliegenden Anforderungen für Versteifungselemente mögliche Profiltypen sowie deren Herstellungs- und Verarbeitungsmethoden ausgearbeitet. Mit der Vorauswahl der Versteifungselemente, erfolgte im Anschluss die Erarbeitung einer Methodik für eine strukturtypenübergreifende standardisierte Anordnung der Versteifungselemente in der Hüllstruktur von Auftriebskörpern. Durch diverse Simulationen konnte identifiziert werden, dass die Positionierung der Versteifungselemente vielfältigen Anforderungen unterliegt. Ebenso resultieren die vorhandenen Produktabmessungen sowie die hohen Strukturgewichte Herausforderungen beim Handling und der Positionierung der Bauteile, weshalb im Rahmen des Vorhabens ein Vorgehen zur 3D-Laservermessung der Hüllstruktur erarbeitet wurde.

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der Projektergebnisse wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

Insgesamt wurde zwischen drei unterschiedlichen Versteifungstypen unterschieden, deren Fertigung sich hinsichtlich der Prozess- und Anlagentechnik in die nachfolgenden Versteifungstypen untergliedern:

- Boden-Versteifungen
- Radial-Versteifungen
- Längs-Versteifungen

Als Ergebnis der vorstehenden Untersuchungen erfolgte eine Detaillierung der Prozessschritte für den Einbau der variierenden Versteifungstypen sowohl aus schematischer, prozesstechnischer Sicht als auch aus Anlagensicht. Die Forschungsaktivitäten haben folglich nicht nur zu einem gesteigerten Prozessverständnis beigetragen, sondern konnten ebenfalls Defizite bzw. Schwachstellen im Fertigungsprozess der einzubauenden Steifen offenbaren. Diese wurden innerhalb des Projekts einer nachgelagerten iterativen Optimierung unterzogen und resultierten in Flussdiagrammen bzw. Baumethodik-Schemata für die jeweiligen oben genannten Versteifungstypen. Exemplarisch ist ein Schaubild in Abbildung 12 vorgestellt.

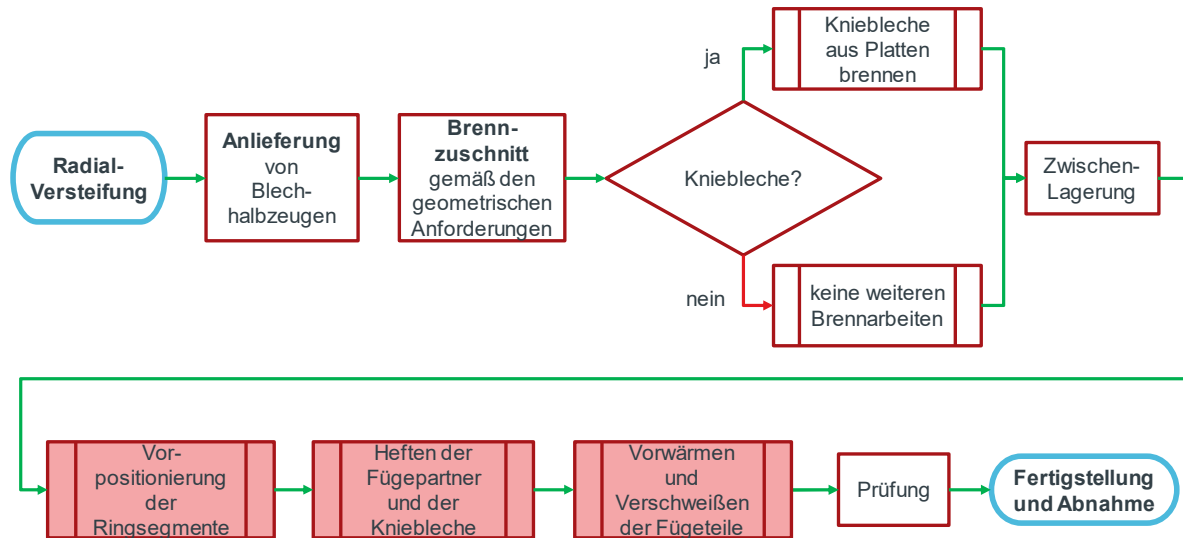


Abbildung 12: Schaubild der Baumethodik zur Fertigung von Radial-Versteifungen in den Grundkörper der schwimmenden Offshore Gründungsstruktur

In den abschließenden Technologieentwicklungen des Arbeitspakets erfolgte die Bewertung der Machbarkeitsgrenzen und des zeitlichen Aufwands für den Einbau der Versteifungen in den drei Unterstrukturtypen von FOWF. Besondere Bedeutung bei der Bewertung der Grenzen der Baumethoden wurde der Zugänglichkeit und dem Handling der Bauteile zugeschrieben, weshalb eine Segmentierung der Steifen auch für Rohrdurchmesser bis zu 15 m eine praktikable Fertigung ermöglichte.

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der Projektergebnisse wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

4.1.3 Automatisierung des Fügeprozesses für Versteifungselemente

Im Vergleich zu konventionellen Monopiles als Gründungsstruktur von Offshore-Windkraftanlagen zeichnen sich die betrachteten Auftriebskörper durch einen signifikant gestiegenen Umfang an zusätzlichen Schweißarbeiten von in der Primärstruktur integrierten Steifen sowie weiteren Anbauteilen, s. g. Secondary-Steel-Bauteilen, aus (siehe Abbildung 13). Hierfür sind Fügeverfahren essenziell, die das effiziente und reproduzierbare Verbinden dieser Bauteile an die Primärstruktur gewährleisten.



Abbildung 13: Hywind-Spar-Buoy und konstruktive Kopplungsstellen / Secondary-Steel-Anbauteile [17]

Innerhalb der Technologieentwicklung wurden im ersten Schritt relevante Füge- bzw. Schweißverfahren analysiert und sowohl das MAG- als auch das UP-Schweißen als besonders geeignet für die vorliegenden Anwendungsfälle identifiziert. Mit der Vorauswahl der Fügeverfahren erfolgte anschließend die Ausarbeitung relevanter Normen und Richtlinien für Schweißverfahren bei Offshore-Gründungsstrukturen, sodass geeignete Anforderungen für die Fertigungstoleranzen abgeleitet werden konnten. Diese konnten folglich sowohl für die relevanten Bauteile, als auch für die zugehörigen Fertigungstechnologien und deren prozessbedingten Randbedingungen herangezogen werden.

Die Automatisierung von Schweißprozessen mittels optischer Sensortechnik stellt nicht nur hohe Anforderungen an die Bild- und Datenerfassung, sondern ebenfalls an die geometrischen Eingangsdaten und deren Prozessdatenverarbeitung. Hierfür wurden umfassende Voranalysen diverser Dateiformate vorgenommen, um die Schnittstellen zum CAD-Modell herstellen zu können. Dies lieferte fundierte Kenntnisse für die anschließende softwaretechnische Umsetzung der zu erarbeitenden Automatisierungslösungen. Zusätzlich wurde ein Ablaufplan (vgl. Abbildung 12) erarbeitet, welcher sowohl die Analyse und Geometrieerfassung, Positionierung und Fixierung als auch Befestigung der Steifen in eine Hüllstruktur berücksichtigt. Er bildete die Basis für nachfolgende Technologieentwicklungen innerhalb des Arbeitspakets.

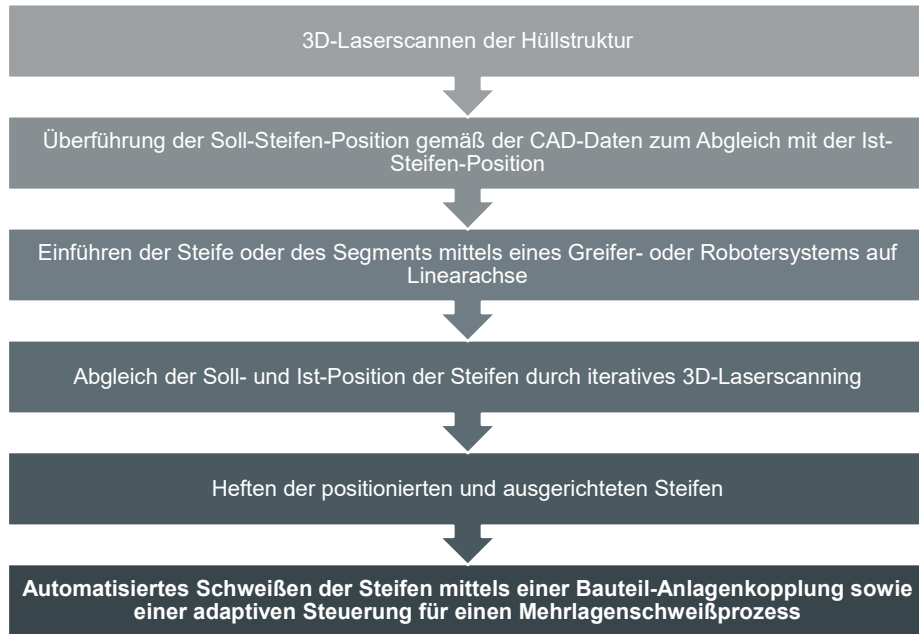


Abbildung 14: Konzeption einer Ablaufplan für einen Fertigungsprozess zum Einbringen von Steifen in einer Hüllstruktur

Eine Zusammenstellung der für eine Schweißplanung erforderlichen Geometrieparameter, die zur Erzeugung von Fügeprozessprogrammen erforderlich sind, wurde am Beispiel einer V-Naht in der nachfolgenden Abbildung 15 visualisiert. Die in den Prozessphasen der Schweißung erforderlichen Randbedingungen können mit entsprechender Messtechnik aufgezeichnet werden und anschließend programmtechnisch in eine Schweiß-Prozessplanung überführt werden.

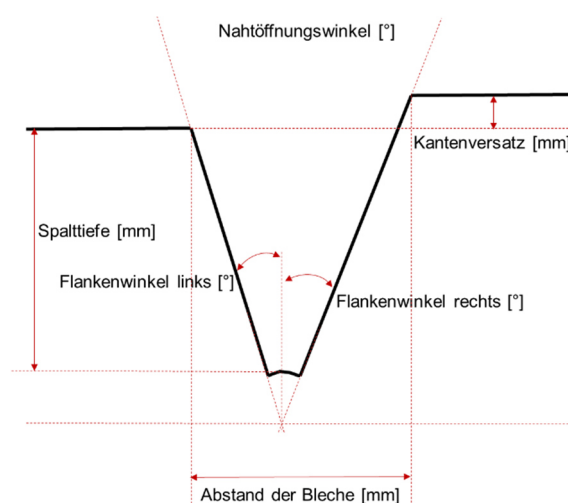


Abbildung 15: Geometriespezifische Randbedingungen für automatisierte Fügeprozesse am Beispiel einer V-Naht

Die konzipierten Anlagen- und Prozesstechnologien, die für die automatisierte Fertigung der Steifen und möglicher Anbauteilen erforderlich sind, konnten innerhalb des Vorhabens durch 3D-CAD-Konstruktionen und daran anknüpfende programmtechnische Entwicklungen gestützt werden. Hierbei galt es die Anforderungen an die Durchmesser der Schwimmkörper, die Bauteilabmessungen der Steifen und die daraus resultierenden Zugänglichkeiten zu berücksichtigen. Daher wurden unterschiedliche Lineareinheiten unter Verwendung von Industrieschweißrobotern berücksichtigt. Die somit erarbeitete Prozesstechnik wurde zudem unter genauer Betrachtung der örtlichen Randbedingungen in dem perspektivischen Fertigungsumfeld detailliert.

Mit der konzeptionellen Umsetzung einfacher Schweißaufgaben erfolgte in der abschließenden Integrationsphase eine praktische Versuchsdurchführung an einem Experimentalprüfstand bei einem externen Partner, sodass die grundlegenden Funktionen und Wirkmechanismen näher untersucht werden konnten. Die erfolgreich durchgeführten Testmuster lieferten weitere Kenntnisse und Optimierungspotenziale der entwickelten Technologien. Diese können in nachgelagerten Detail-Entwicklungen für den Einsatz in der Fertigung von schwimmenden Offshore-Gründungsstrukturen einen substantziellen Vorteil gegenüber klassischen manuellen Fügeverfahren bieten.

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der Projektergebnisse wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

4.1.4 CAD/CAM-Workflows für die Fertigung von schwimmenden Offshore-Wind-Foundations

Die Technologieentwicklung für CAD/CAM-basierte Workflows zur Fertigung von FOWF war Bestandteil weiterer Untersuchungen. Im ersten Schritt wurden die Randbedingungen von Datenerfassungssystemen für den vorliegenden Anwendungsfall mit dem Ziel einer geometrischen Kopplung von Prozesstechnik und Bauteil erarbeitet. Die Basis bildete die Erstellung eines Lastenhefts, welches die wesentlichen Anforderungen aller Fachbereiche enthielt. Das Lastenheft mündete anschließend in einer Gegenüberstellung diverser Systeme (z. B. optisch - DIC [engl. Digital-Image-Correlation]; Scanning - Streifenmuster, Laserscanner), vgl. Abbildung 16.

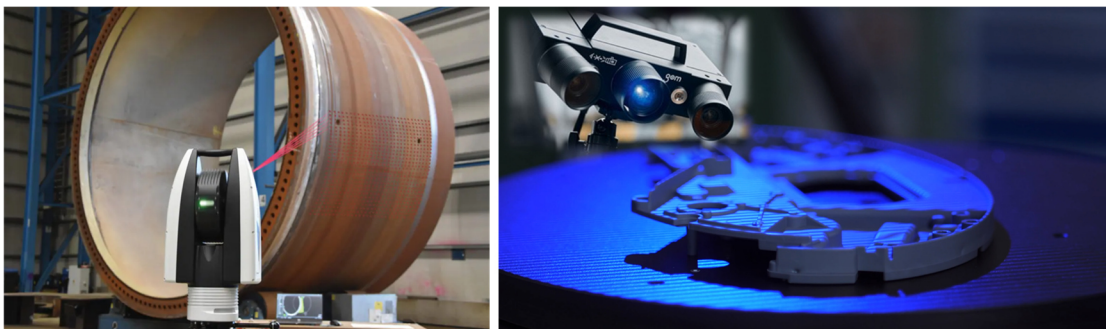


Abbildung 16: Industrielle Anwendung eines Laserscanners zur messtechnischen Erfassung von Strukturen (li. [18]) und ATOS Q-Streifenlicht-Messprinzip (re. [19])

Die objektive Bewertung der Systeme anhand von Qualitätskriterien und der erarbeiteten Anforderungen hat ergeben, dass die rein optischen Systeme den laserbasierten Systemen im vorliegenden Anwendungsfall unterlegen sind. Der Grund ist die hohe Sensitivität in Bezug auf Bewegungen, Transport, Erschütterungen und äußeren Umgebungseinflüssen. Demgegenüber konnten die Ausarbeitungen den Laserscannern oder s. g. Laserlinienschnittsensoren eine hohe Eignung bescheinigen, da diese mit relativ einfachen Mitteln vor Ort bzw. am Schweißgerät appliziert werden können und bereits praktische Erfahrung mit dieser Art Laser für den Anwendungsfall besteht. Beispielhaft ist ein entsprechendes Tool der Firma SERVROBOT GmbH zu nennen, dass zur 2D sowie 3D- Echtzeit-Nahtverfolgung eingesetzt werden kann (siehe Abbildung 17).

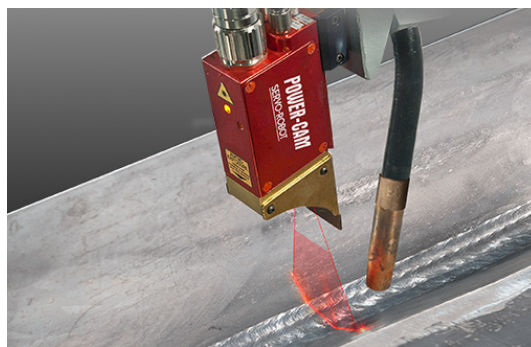


Abbildung 17: 3D-Robot-Vision zur Lichtbogennahtverfolgung [20]

Im weiteren Verlauf des Arbeitspakets wurde auf den vorherigen Ergebnissen aufbauend ein Konzept erarbeitet, dass eine lageabhängige geometrische Kopplung zwischen dem Auftriebskörper, dem Einbauteil und der Fügeprozesstechnik ermöglicht. Hierfür waren im Sinne der Prozesssteuerung unterschiedliche Koordinatensysteme miteinander zu verknüpfen, sodass die Einzelsysteme und Strukturbestandteile einander zugeordnet werden konnten. Zu nennen sind hierbei:

- Referenz-Koordinatensystem der Anlagentechnik (Schweißroboter), z. B. im Fundament
- lokale Koordinatensysteme der TCPs (Tool-Center-Point) der Schweißroboter
- lokales Koordinatensystem der Hüllstruktur des schwimmenden Auftriebskörpers
- lokale Koordinatensysteme der Versteifungselemente

Es folgten detaillierte Ausarbeitungen sowie Technologieentwicklungen zur Bauteil-Anlagenkopplung durch die 2D- und 3D-Visualisierung unter Berücksichtigung der erforderlichen Systemtechnik, der Schweißroboter-Zugänglichkeit sowie spezifischer Workflows zum Einschweißen von Versteifungen und eventuell erforderlicher Kniebleche.

Die vorgestellte Systementwicklung umfasste darüber hinaus eine Spezifizierung von Datenbankschnittstellen, die neben einer Zustandsüberwachung auch zur Qualitätsbewertung der erzeugten Mehrlagenschweißungen eingesetzt werden konnten. Hierfür erfolgte innerhalb des Vorhabens die Konzeptionierung einer Datenbankstruktur, die an die obenstehenden Systembestandteile angeknüpft war. Beispielhaft sind nachfolgend relevante Prozessparameter zu nennen, die während eines Schweißvorgangs aufgezeichnet und in eine Datenbank geschrieben werden können:

- Nahttyp
- Nahtnummer
- Schweißverfahren
- Schweißposition
- Schweißprozessparameter:
 - Schweißgeschwindigkeit
 - Drahtvorschub
 - Lichtbogen
 - Offset
 - Höhensoll- und Istwert
 - Pendelbreite
 - Pendelfrequenz

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der Projektergebnisse wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

4.2 Planungstechnologien für Zwei-Produkt-Matrix Fertigungsstätten und marktadaptiv global vernetzte Wertschöpfungsprozesse

Im TK3 wurden Themenstellungen zur Fertigungsprozessplanung sowie hinsichtlich global vernetzten Wertschöpfungsprozessen in Kooperation mit dem Fraunhofer IGP entwickelt. Nachfolgend werden die Kernergebnisse der fertigungsprozessintegrierten Baumethodikbewertung sowie den installationsoptimierten Wertschöpfungsnetzwerkplanungen zusammenfassend beschrieben.

4.2.1 Fertigungsprozessintegrierte Baumethodikbewertung

Die Fertigung schwimmender Gründungsstrukturen erfordert eine eingehende Überprüfung der Baumethodik und der Fertigungsprozessplanung aufgrund der variierenden Anforderungen, Strukturdimensionen und Fertigungsprozesse im Vergleich zu konventionellen Monopiles. Daher wurden im ersten Schritt die Rahmenbedingungen hinsichtlich der Grenzwerte für standortspezifische Parameter, Logistik und Produktion ausgearbeitet, die nachfolgend stichpunkthaft zusammengefasst sind:

Standortspezifische Parameter:

- Platzbedarf
- Restriktionen
- Regularien

Logistikparameter:

- Transportwege
- Abstellflächen
- Lagerflächen
- Zugänglichkeitsanforderungen
- Taktzeiten
- Bauteilhandling (Kran- und Hebetechnik)

Prozessspezifische Parameter:

- Anlagentechnik
- Verfahr- und Drehvorrichtungen
- Gerüste
- Hebemittel
- fertigungs- und produktspezifische Anforderungen

Als Detailuntersuchung wurde folglich die Horizontal (HBM) - und Vertikalbaumethodik (VBM) (siehe Abbildung 18) näher betrachtet sowie deren Spezifika in einer Bewertungsmatrix beurteilt. Es konnten wesentliche prozesstechnische Vor- und Nachteile der beiden Methoden erarbeitet werden, die als Grundlage für die Folgeuntersuchungen des Arbeitspakets gedient haben. Die klassische horizontale Baumethodik hat in vielen Bereichen Vorteile gegenüber der Vertikalbaumethodik aufgezeigt. Nichtsdestotrotz konnte dargestellt werden, dass in Anbetracht der spezifischen Strukturdimensionen von FOWF eine Fertigung in der Vertikalbaumethodik einen produktionstechnischen Vorteil bieten kann, insofern die technischen Rahmenbedingungen darauf abgestimmt werden. Zu nennen sind insbesondere Einbaumaßnahmen von strukturellen Versteifungen in einzelnen Sektionen von schwimmenden Gründungsstrukturen.

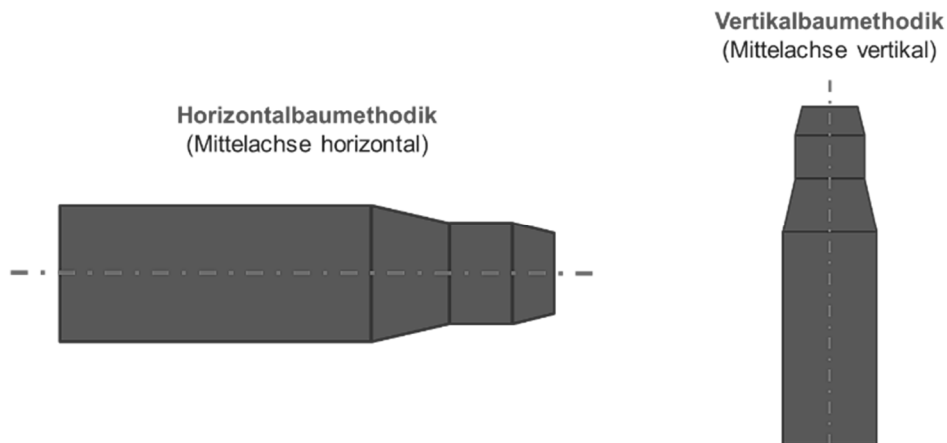


Abbildung 18: Bewertungsgrundlage für Baumethodik-Konzepte

Für eine weiterführende Baumethodikbewertung wurde innerhalb des Vorhabens eine Software entwickelt, deren Kernaufbau und Funktion nachfolgend zusammenfassend vorgestellt wird. Das Ziel der geschlossenen Softwarelösung sollte es sein, eine durchgehende Technologie bzw. Methodik zu erarbeiten, die aus einer Vorkonzeption einer FOWF eine Baumethodikbewertung, Geometrieaufbereitung im CAD, das Ableiten von Arbeits- und Schweißplänen sowie die Bewertung der vorhandenen Maschinen und Anlagen für die Fertigung ermöglicht.

Für das Beispiel einer Sektion bzw. eines Segments einer schwimmenden Offshore-Gründungsstruktur können beispielhaft die folgenden Kenngrößen klassifiziert werden (vgl. Abbildung 19):

- Rohrsegmenthöhe (entspricht der Zylinderhöhe)
- Außendurchmesser
- Innendurchmesser
- Blechstärke
- Anzahl der Längsnähte
- resultierendes Produktgewicht
- Biegeradius

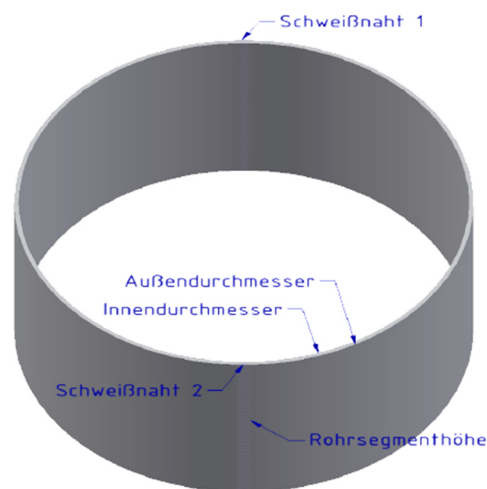


Abbildung 19: Beispiel eines Rohrsegments mit beispielhaften Kriterien zur Baumethodik-Bewertung [21]

Im Strukturablauf wurde das Tool derart gestaltet, dass im ersten Schritt Daten einer vordimensionierten Struktur eingelesen werden können. Im Anschluss werden die Daten einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und aus den nichtstrukturierten Daten werden basierend auf allgemeinen Fertigungsrandbedingungen Sektionen und Segmente, s. g. Schüsse, abgeleitet. Die so erstellten Daten werden abschließend in eine tabellarische Übersicht überführt, siehe Tabelle 4. Der Ablauf bildete die Basis für die anschließende CAD-Aufbereitung und das Ableiten weiterer produktionsorganisatorischer Randbedingungen.

Tabelle 4: Auszug einer Segmentierung der zu fertigenden Struktur

Project	ID1	ID2	Diameter	Length / Weight	Section Distribution														
OWSplus-Structure	SB-01	100	15000	136															...
				FI	x	2	x	3	x	4	x	5	x	6	x	7			
				Section 1: 480t / 18m / COG 8,25m							Section 2: 475t / 17m / COG 7,80m								

Hierzu zählten Integrationen zum Ableiten von Arbeitsplänen und zur Prozesszeitenkalkulation, die eine maßgebliche Unterstützung für die Vorplanung bilden können. Darüber hinaus wurde durch eine softwaretechnische Umgebung eine Bewertung vorhandener Betriebsmittel für den Produktionsauftrag ermöglicht. Eine überblickhafte Darstellung des Ablaufs zur Auswertung und Speicherung der Daten innerhalb der Programmumgebung ist der nachfolgenden Abbildung 20 zu entnehmen.

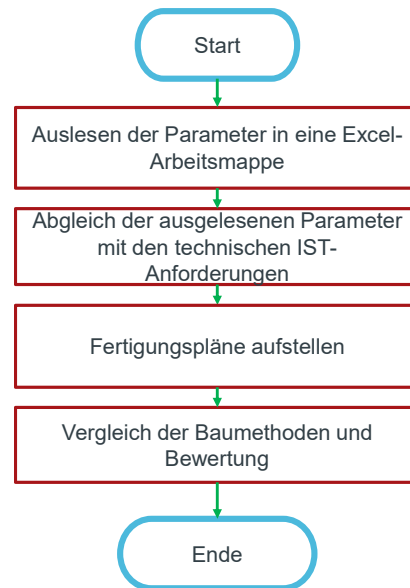


Abbildung 20: Grundlegendes Ablaufschema der Baumethodikbewertung

Zusammenfassend ist somit zu konstatieren, dass mit der im Arbeitspaket entwickelten Technologie auf Basis einer vordimensionierten Struktur die Baumethodikbewertung für die Produktion von FOWF erfolgen kann und zudem Optimierungsansätze abgeleitet werden können. Dies stellt im Vergleich zu einer auf Erfahrungen und einer händischen Auswertung beruhenden Analyse einen maßgeblichen Zugewinn hinsichtlich der Planungseffizienz dar.

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der Projektergebnisse wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

4.2.2 Installationsoptimierte Wertschöpfungsnetzwerkplanung

Eine installationsoptimierte Wertschöpfungsnetzwerkplanung bietet Potenziale für die effiziente Fertigung von FOWF und erforderte innerhalb des Verbundvorhabens die interdisziplinäre Zusammenarbeit unterschiedlicher Abteilungen. Als Ergebnis der Technologieentwicklungen wurden im ersten Schritt allgemeine Produktionsstandortprofile hinsichtlich den Anforderungen und Randbedingungen an:

- das Personal (Umfang, Verfügbarkeit und Qualifizierung),
- die verkehrstechnische Anbindung und Logistik,
- die Standort-Randbedingungen bzgl. Hafenanbindung und Verfügbarkeit von Liegeplätzen und Zugänglichkeit sowie
- die Anbindung einzelner Fertigungsstandorte untereinander (Entfernung, See-straßen, nautische Randbedingungen) erarbeitet.

Mit den kumulierten Kenntnissen folgten Detailbetrachtungen im Hinblick auf die Fertigungstiefe, Stichwort *vertikale Integration*, einzelner Fertigungsstandorte und die dabei zu erzielenden Vor- und Nachteile bzgl. des Warenflusses und der Gesamt-Produktionseffizienz. Auf Basis von kennzahlenbasierten Methoden wurde offensichtlich, dass durch eine hohe vertikale Integration zwar Logistikprozesse vereinfacht werden können, jedoch ein maßgeblicher Anstieg erforderlicher Maschinenkapazitäten und lokaler Ressourcen resultiert.

Unter Berücksichtigung der in AP1/2 entwickelten Technologien zur Bewertung der Fertigungsprozesse erfolgte die Erstellung einer formularbasierten Methodik zur Bestimmung von Anforderungsprofilen von Produktionsstandorten in Kooperation mit dem Fraunhofer IGP. Die fertigungsspezifischen Daten können über eine Eingabemaske erfasst werden und anschließend zur weiteren Bewertung mit vorhandenem Equipment eingesetzt werden. In firmeninternen Studien konnten die erarbeiteten Tools bezüglich der Usability getestet werden, die im Verlauf der Entwicklungstätigkeiten in einer Detaillierung und Verbesserung der Tools resultierten. Beispielhaft ist ein Auszug einer Anforderungsmatrix in Abbildung 21 visualisiert. Die aufgenommenen Daten liefern die Basis für das Erstellen von Bewertungsmustern zur Gewichtung sowie zur Priorisierung von vernetzten Wertschöpfungsprozessen. Hierbei wurde ebenfalls auf interaktive Formulare und Auswerteroutinen zurückgegriffen, sodass für die spätere Integration der Tools in die Fertigungs- und Unternehmensplanung eine schnelle Einarbeitung gewährleistet werden kann.

Vorbereitung:	min. Blechlagerkapazität:	<input type="text" value="500"/>	t
	max. Blechlänge:	<input type="text" value="5000"/>	mm
Schussfertigung:	max. Blechstärke:	<input type="text" value="12"/>	mm
	max. Schussbreite:	<input type="text" value="4500"/>	mm
	max. Stückgewicht:	<input type="text" value="250"/>	t
	Schussdurchmesser max/min:	<input type="text" value="10500"/>	mm / <input type="text" value="3750"/> mm
Zwischenlager Schuss:	min. Zwischenlagerkapazität:	<input type="text" value="600"/>	t
Sektionsfertigung:	max. Sektionslänge:	<input type="text" value="13000"/>	mm
	max. Sektionsgewicht:	<input type="text" value="500"/>	t
Zwischenlager Sektion:	min. Zwischenlagerkapazität:	<input type="text" value="10000"/>	t
Endmontage:	max. Länge Monopile:	<input type="text" value="45000"/>	m
	max. Stückgewicht Monopile:	<input type="text" value="1400"/>	t
	min. Fertigteillagerkapazität:	<input type="text" value="20000"/>	t

Abbildung 21: Anforderungsmatrix - Beispiel-Produktionsdetails von Floating-Strukturen (nicht-repräsentative Daten) [22]

Für die Bewertung und Strukturierung von Fertigungs- und Logistikaufgaben ist neben der Kenntnis der Produktionsdetails die Informationen über spezifische Standortfaktoren erforderlich. Die Standortfaktoren werden ebenfalls mittels Eingabemasken, die im Austausch mit dem Fraunhofer IGP entwickelt worden sind, vergleichbar gemacht, indem ein Workflow zur Eingabe und Verarbeitung der Daten erarbeitet worden ist. Beispielhaft ist eine derartige Gegenüberstellung zweier Standorte durch den Vergleich einer Biegemaschine/Walze durchgeführt worden, wie in der nachfolgenden Abbildung 22 gezeigt werden kann.

Die Eingabemasken und entwickelten Routinen haben eine Strategie zur Bewertung von Produktionsstandorten sowie vernetzten Fertigungsstätten geliefert, die in der Integrationsphase am Beispiel der Fertigung von Floating-Strukturen getestet und optimiert worden sind.

Standortfaktoren Walzen Biegemaschine	Standortalternative A Rostock	Standortalternative B Danzig
Anzahl [Stk.]	<input type="text" value="x"/>	<input type="text" value="x"/>
Anzahl Kalibrierwalzen [Stk.]	<input type="text" value="x"/>	<input type="text" value="x"/>
max. Walzkraft Oberwalze [kN]	<input type="text" value="x"/>	<input type="text" value="x"/>
max. Blechbreite [mm]	<input type="text" value="x"/>	<input type="text" value="x"/>
max. Rohrdurchmesser [mm]	<input type="text" value="x"/>	<input type="text" value="x"/>
Genauigkeit Kalibrierwalze +/-[mm]	<input type="text" value="x"/>	<input type="text" value="x"/>
	<input type="button" value="Übernehmen"/>	<input type="button" value="Zurück"/>

Abbildung 22: Auswahl und Vergleich von Standortfaktoren am Beispiel einer Biegemaschine/Walze [22]

Bei der Bewertung von Fertigungsnetzwerken spielt die Qualität der Input-Daten eine essentielle Rolle für die resultierenden Ergebnisse und daraus abgeleiteten Interpretationen. Die Auswertungen konnten zeigen, dass möglichst exakte Daten für Maschinen, Anlagen aber auch der zu fertigenden Strukturen vorgehalten werden müssen, um eine verlässliche Auswertung sowie Prognose zu liefern. Da sich dies häufig als größte Herausforderung darstellt, gilt es bei der Überführung des Tools in die Produktionsplanung entweder durch intensive Recherchen des Standes der Technik oder durch präzise Anfragen bei Maschinenanbietern oder Zulieferern Informationen zu generieren.

Mit den Tools zur Wertschöpfungsnetzwerkplanung, die oben vorgestellt worden sind, galt es weitere Anforderungen an die Projektdokumentation sowie produktionsstandortspezifischen Kompetenzen zu generieren. Diese sind für eine standardisierte, effiziente sowie zielorientierte

globale Fertigung ebenfalls von maßgebender Bedeutung, sodass der Fokus im ersten Schritt auf die Anforderungen und Zielstellung gelegt worden ist. Die Projektdokumentation beinhaltet Dokumente in Bezug auf den Projektauftrag, Projektstrukturpläne mit Zeitangaben und bspw. GANTT-Diagrammen und vielen weiteren Daten, die für eine erfolgreiche Projektgestaltung erforderlich sind. In einem GANTT-Diagramm werden erforderliche Tätigkeiten in einer Abfolge von Aktivitäten in grafischer Form von Balken auf einer Zeitachse dargestellt, um zu jeder Zeit der Projektbearbeitung genaue Aussagen über den Projektfortschritt, erforderliche Zuarbeiten bspw. durch externe Partner oder Terminpläne des Auftraggebers zu ermöglichen.

Um im Anschluss Produktionsfaktoren für Standorte abzuleiten und zu gewichten, erfolgte darüber hinaus eine Einteilung in monetäre/quantitative sowie qualitative Faktoren

Die Gegenüberstellung unterschiedlicher Produktionsstandorte wurde neben monetäre/quantitative sowie qualitative Produktionsfaktoren durch den Einsatz s. g. Marktfaktoren (Marktpotenzial, Marktattraktivität, Marktstruktur, Konkurrenzsituation, Strategie der Wettbewerber bzw. Handelshemmnisse) sowie der erreichbaren Performance (anvisierte Erlöse, Prozessgüte, Soft Facts der Performance, Produktivität und Kostenstruktur) untermauert.

Sämtliche Methoden und Technologien, die innerhalb des Arbeitspaketes entwickelt worden sind, haben dazu beigetragen Produktionsstandorte sowie vernetzten Fertigungsstätte anhand von Bewertungs- und Nutzwertanalysen zu beurteilen. Es wurde durch den Test der Tools mit nicht am Entwicklungsgeschehen beteiligten Personal die Bedienungsfreundlichkeit (Usability-Tests), die Vollständigkeit und die Funktionalität (Bug-Reports) geprüft. Durch eine darauf angeknüpfte Excel-basierte Auswertung der Daten ist eine weiterführende Bewertung der oben vorgestellten Eingabedaten realisierbar, was somit einen maßgeblichen Benefit für die installationsoptimierte Wertschöpfungsnetzwerkplanung darstellt.

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der Projektergebnisse wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

4.3 Unterstrukturtypenunabhängige automatisierte und fertigungsintegrierte Beschichtungstechnologien

Wie bei klassischen Monopiles müssen Floating-Strukturen einer Korrosionsschutzbehandlung unterzogen werden. Innerhalb des Vorhabens wurden diese Betrachtungen zusammen mit der Krebs Korrosionsschutz GmbH durchgeführt, die sich explizit mit Applikationsmethoden, Restriktionen, Werkstoffeigenschaften und Anforderungen der Beschichtung auseinandergesetzt hat. Es galt zu prüfen, wie die Beschichtungsprozesse in die stahlbauliche Fertigung von schwimmenden Unterstrukturen integriert werden können und welche Randbedingungen hinsichtlich Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltschutzaspekten zu berücksichtigen sind. Ebenfalls wurden betriebstechnische Randbedingungen in Bezug auf das Handling der Strukturen betrachtet.

4.3.1 Beschichtungsprozesse

Zu Beginn der Forschungstätigkeiten galt es in enger Kooperation mit der Krebs Korrosionsschutz GmbH die Applikationsmethoden sowie deren Integration in den Fertigungsablauf zu prüfen. Im Wesentlichen konnten die drei nachfolgend gelisteten Methoden der fertigungsintegrierten Beschichtung identifiziert werden:

- Beschichtung im Bereich Schussfertigung
- Beschichtung im Bereich Sektionsfertigung
- Beschichtung im zusammengebauten Zustand

Jede der drei gelisteten Methoden wurde anschließend über Prozessschemata visualisiert und derart aufbereitet, dass eine Bewertung der Vor- und Nachteile durchgeführt werden konnte. Ein Beispiel der Visualisierung ist der untenstehenden Abbildung 23 zu entnehmen.

Die Analyse und Konzeption der Beschichtungsmöglichkeiten im Prozessablauf erfolgte durch die Betrachtung s. g. Technologieintegrationspunkte. Die Arbeiten wurden interdisziplinär in engem Austausch mit der Krebs Korrosionsschutz GmbH vorgenommen. Somit konnten frühzeitig geeignete Prozesse hinsichtlich der steigenden sicherheits- und umwelttechnischen Aspekte entwickelt werden.

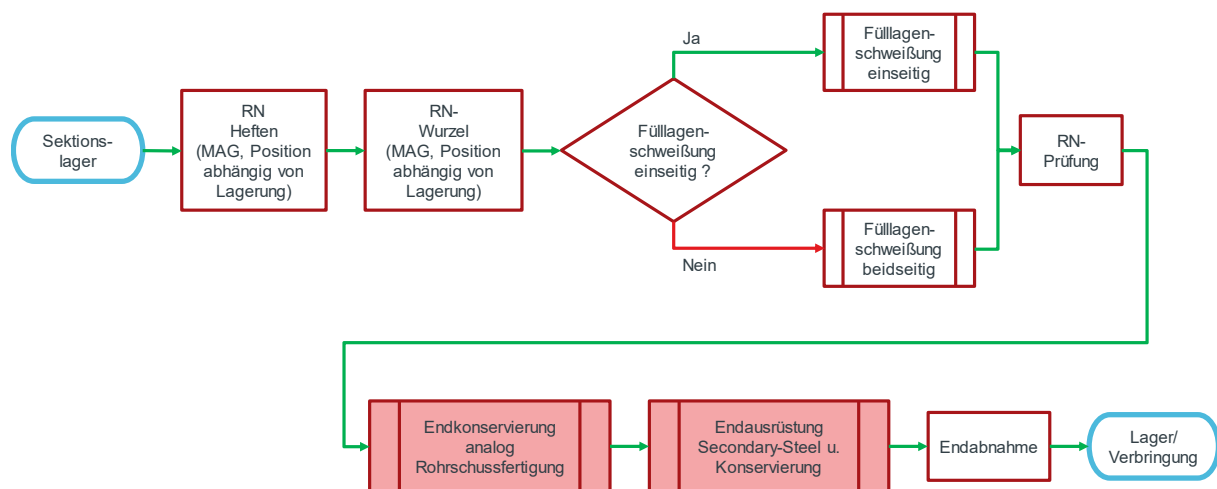


Abbildung 23: Prozessablauf inkl. Konservierung im Endzusammenbau-Status

Die Analysen hinsichtlich des Transports, des Bauteilhandlings und der Ablage der Einzelkomponenten, Sektionen oder zusammengesetzten Strukturen erfolgte anschließend innerhalb des Arbeitspakets mittels Finite-Elemente-Simulationen in der ANSYS Workbench-Umgebung. Bei den Untersuchungen wurde das Augenmerk auf die belastungsspezifischen Randbedingungen und der strukturellen Integrität gelegt. Mit voranschreitenden Designvarianten

der Schwimmkörpers konnten die Berechnungen eine Zunahme der Herausforderungen offenbaren, deren Ursprung die Zunahme des Strukturgewichts war. Insbesondere im zusammengebauten Zustand unterliegt die bevorzugt eingesetzte drehende Beschichtung (FOWF wird auf Ablagestation in Bearbeitungszentrum platziert und um die horizontal angeordnete Mittelachse gedreht), besonderen Herausforderungen aufgrund der lokalen Lasteinleitungspunkte/Kontaktstellen. Eine Übersicht der relevanten Lastszenarien, die numerisch betrachtet worden sind, ist Abbildung 24 zu entnehmen.

Lastszenarien
▪ temporäres Lagern einzelner Sektionen oder zusammengesetzter Strukturen vor dem Beschichtungsprozess
▪ Transport der Strukturen in Beschichtungshallen mittels s.g. SPMT-Schwerlastfahrzeugen
▪ Ablage und Positionierung der Struktur auf Drehvorrichtungen unter Berücksichtigung der strukturellen Integrität des Rohrs und der Betriebsmittel
▪ automatisiertes Strahlen der Hüllstruktur durch iteratives, spurweises Abfahren der Flächen und Reinigen der Flächen
▪ Beschichten der Struktur mit mineralischen oder organischen Materialien

Abbildung 24: Prozessablauf inkl. Konservierung im Endzusammenbau-Status

Damit die strukturelle Integrität im Bereich des Bodens des Schwimmkörpers gewährleistet werden konnte, war die Überarbeitung des Equipments zur drehenden Beschichtung erforderlich. Ursächlich sind die aus struktureller Sicht erforderlichen Versteifungen im Boden, die zu maßgeblichen Beanspruchungen des Betriebsmittels und der Hüllstruktur führen. Diesbezüglich wurde im Rahmen des Projekts eine Drehvorrichtung konzipiert, konstruiert und berechnet, die in der Lage ist das Strukturgewicht aufzunehmen und die strukturelle Integrität des Schwimmkörpers zu wahren.

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der entwickelten Betriebsmittel wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

Im Hinblick auf die funktionale Gestaltung eines Beschichtungsprozesses konnte in Übereinstimmung mit der Krebs Korrosionsschutz GmbH festgehalten werden, dass die Umsetzung der Beschichtung am effizientesten ist, wenn der Prozess räumlich separiert und unabhängig von der restlichen Stahlbaufertigung erfolgt. Hierbei sind insbesondere die Anforderungen des Arbeitsschutzes maßgebend, da andernfalls:

- eine gegenseitige Gefährdung von einander angrenzenden Prozessen,
- hohe Kosten zur Integration der Beschichtung in die Fertigung durch erhöhte Sicherheitsmaßnahmen,

- ein hoher technischer Aufwand zur Gewährleistung des Brand- und Explosionsschutzes,
- zusätzliche behördliche Genehmigung,
- Platzlimitierungen (Begrenzung des Arbeitsraums) und
- Einschränkungen der Freiheitsgrade im Bereich der eingesetzten Maschinen resultieren.

Eine separate Halle, an dem die Beschichtung durchgeführt werden kann, ist gemäß den durchgeführten konzeptionellen Entwicklungen die funktionalste Lösung, die nicht zwangsläufig dem Prozess einer Fertigungsintegration widersprechen muss. Stattdessen ist es lediglich eine örtliche Trennung der stahlbaulichen Fertigung und Beschichtung z. B. von einzelnen Schüssen, Sektionen oder Gesamtstrukturen von FOWF.

Bei der ausgelagerten Beschichtung kann sämtliche zur Beschichtung erforderliche periphere Technik von Grund auf an den Prozess angepasst werden. Dies ermöglicht sowohl eine Reduzierung der Prozess-Risiken als auch eine Kostenreduktion, die für die Implementierung der Beschichtung entstehen.

Zu den Vorteilen gehören darüber hinaus:

- Anpassung des Raums an den Prozess im Zusammenhang mit den Maschinen, Komponenten (Secondary Steel)
- funktionale Raumgestaltung zur Einhaltung von Arbeitsschutzrichtlinien
- mögliches Erweiterungspotential für zukünftige Projekte oder anderen Verfahren
- bessere Integration von Technik zum Schutz der Arbeiter vor schädlichen Emissionen, die vom Prozess ausgehen können
- strukturierte Abführung von Prozessnebenprodukten, wie bspw. Abfälle
- Schutz vor Witterung

Eine vollständige Integration des Beschichtungsprozesses in die Fertigung des Stahlbaues, durch Integration in die Gegebenheiten vor Ort, wird in Bezug auf gegenwärtige Konzeptionen des Beschichtungsprozesses und den zu beschichtenden Komponenten nur unter hohen Kosten und strengen Auflagen zu realisieren sein.

4.3.2 Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltaspekte bei der Beschichtung von FOWF

Der Beschichtungsprozess impliziert die Betrachtung von Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltaspekten unter Berücksichtigung der Randbedingungen einer fertigungsintegrierten Beschichtung. Im ersten Schritt wurden die Regelwerke und Restriktionen für derartige Sys-

teme innerhalb des Vorhabens analysiert. Hierbei wurde insbesondere auf die Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) und weiteren Normen (z.B. EN ISO 13855 und EN ISO10218) Rücksicht genommen, die wesentliche Anforderungen an z. B. Mensch-Maschinen-Kollaborationen beschreiben. Die identifizierten Hauptrestriktionen waren:

- die Einhaltung von Sicherheitsabständen zum Bediener gemäß EN ISO 13855
- Begrenzung von Kräften gemäß EN ISO 10218
- Überwachungssystem zur Einhaltung von Geschwindigkeiten, Kräften und der sich ständig wechselnden Positionen
- Überwachung/Monitoring der Maschine auch während eines Fehlerfalls; ein Ausfall eines Bauteils resultiert in keiner Beeinflussung einer Sicherheitsfunktion

Anschließend wurden Konzepte für eine funktionale Gestaltung der Beschichtungsperipherie abgeleitet sowie ein Beschichtungsprozess erarbeitet, welcher die verfahrensspezifischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen beinhaltet (siehe Abbildung 25).

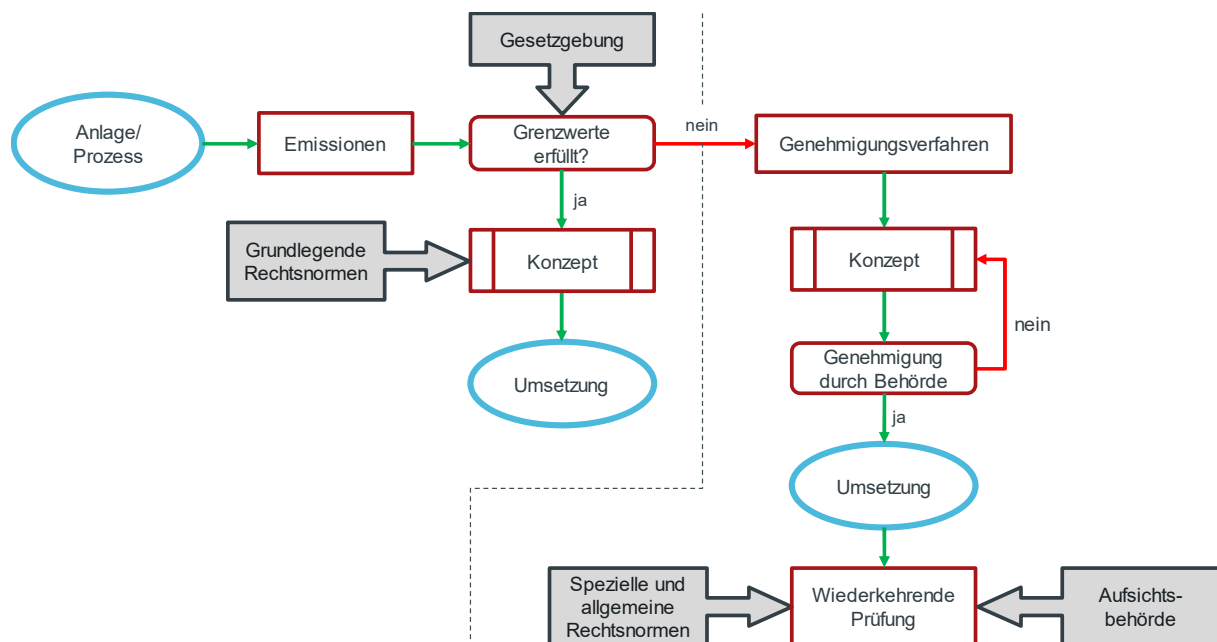


Abbildung 25: Verfahrensspezifische und gesetzliche Rahmenbedingungen zur Etablierung eines Beschichtungsprozesses für FOWF

Gemäß Abbildung 25 muss im Vorfeld eine Prüfung des Prozesses hinsichtlich deren Umwelt- auswirkungen sowie den angrenzenden Prozessen erfolgen. Dazu muss der Beschichtungs- prozess vorab durch eine Prüfung der zu erwartenden Emissionen bewertet werden. Diese Bewertung erfolgt in Übereinstimmung mit der geltenden Gesetzgebung/Verordnung. Die zu prüfenden Emissionen, die gleichzusetzen sind mit den zu erwartende Emissionen, können hierbei sein:

- Strahlung in Form von Wärme
- Elektromagnetismus
- Staub
- Lärm
- Dämpfe
- Explosionsgefährdung

Sobald der Beschichtungsprozess einen der zu prüfenden Parameter erfüllt, ist die ganze Anlage als genehmigungspflichtig einzustufen. Im Bereich der Beschichtung mit lösungsmittelhaltigen Beschichtungsstoffen in der Dimension, wie es hier betrachtet wird, ist aufgrund der Menge der freigesetzten Lösungsmittel immer von einer Genehmigung der Anlage auszugehen. Aus der Genehmigung heraus wird ein Schutzkonzept zur Gestaltung des Beschichtungsprozesses mit allen angrenzenden Prozessen erstellt. Hierzu gehören die Konzepte zum Schutz der Umwelt, die innerbetrieblichen Schutzmaßnahmen sowie die räumlichen Gegebenheiten.

Die Alternative ist die Gestaltung der beiden oben genannten Beschichtungsprozesse in der Art, dass die zu erwartenden, die von den Prozessen ausgehenden Emissionen soweit minimiert werden, dass sie die Schwellenwerte aus den Gesetzgebungen nicht erreichen. Daraus würde resultieren, dass die einzuhaltenden Anforderungen auf ein Minimum reduziert werden und der Freiheitsgrad der möglichen Gestaltung der Peripherie der Beschichtung und der Umsetzung steigt.

Es kann zusammenfassend konstatiert werden, dass für die spezifische Gestaltung der Anlagentechnik sowie zur Gestaltung des Gesundheits-, Umwelt- und Arbeitsschutzkonzepts eine Vielzahl unterschiedlicher Randbedingungen und Annahmen zu berücksichtigen sind. Mit dem in Abbildung 25 vorgestellten Schaubild und den weiteren Ausarbeitungen innerhalb des Arbeitspakets wurde ersichtlich, dass lediglich durch eine Separierung von Beschichtung und stahlbaulicher Fertigung der Einfluss auf die Umwelt minimiert werden kann.

In den weiteren Technologieentwicklungen folgten Ausarbeitungen hinsichtlich der räumlichen Trennung und das Ableiten von Prozess-Emissionen (Dämpfen, Hitze & Lärm). Darüber hinaus wurden geeignete Lösungsansätze zum Ableiten flüchtiger Prozessnebenprodukte mittels Absaugsystemen sowie die Behandlung der Beschichtungsprozessnebenprodukte, die bei der Beschichtung anfallen, erarbeitet.

Jegliche entwickelten Methoden sowie die erarbeiteten Lösungsschritte haben zu einem gesteigerten Prozessverständnis in Zusammenarbeit mit der Krebs Korrosionsschutz GmbH beigetragen. Somit konnten die entwickelten Betriebsmittel für die drehende Beschichtung mit den verfahrensspezifischen und gesetzlichen Anforderungen in Einklang gebracht werden. Dies bietet Potenzial durch eine weitere technische Detaillierung und Umsetzung, sobald die im Verbundprojekt und darüber hinaus entwickelten schwimmenden Unterstrukturen marktreife besitzen.

4.4 Universelle modulbasierte Transport- und Handhabungstechnologien

Nachfolgend werden die Projektergebnisse hinsichtlich den Entwicklungstätigkeiten zu einer Transport- und Anschlagkonstruktionen zum Handling schwimmender Unterstrukturen sowie Teilstrukturen beschrieben. Die Arbeiten fanden in Kooperation mit der Neptun Ship Design GmbH (NSD) statt. Im ersten Schritt der Entwicklungstätigkeiten wurden die relevanten Lastfälle erarbeitet und die Anforderungen an ein standardisiertes Transportmodul abgeleitet. Als grundlegender Wertebereich für schwimmende Offshore-Gründungsstrukturen konnte ein max. Durchmesser zwischen 8 m und 15 m identifiziert werden.

Eine Übersicht relevanter Lastfälle ist der nachfolgenden Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Lastfälle für ein Transportmodul

Kranen von Schüssen, Sektionen	Wenden / Upending	Kran- oder Hebebetrieb mit Befestigungs- bzw. Anschlag-konstruktion	Demontage bzw. Deinstallation
Transport von Schüssen oder Sektionen von einer zur nächsten Ablagestation oder für den Transport mittels SPMT-Schwerlastfahrzeug	Wenden einer Sektion für das Einschweißen von Einbauteilen oder für das Zusammenbauen in Vertikalbauweise	Verladen bzw. Abladen des Spar-Buoys vom Transportvessel	Iterative Demontage der Struktur; Möglichkeit der Separation einzelner Segmente und Transport mittels Kran

Innerhalb des stahlbaulichen Wertschöpfungsprozesses bzw. des Fertigungsprozesses ist zu gewährleisten, dass sämtliche Prozessschritte gemäß den Anforderungen durchgeführt werden können, ohne dass eine Beeinträchtigung durch das Transportmodul resultiert. Vor diesem Hintergrund sind die nachfolgenden Randbedingungen definiert worden:

- Zugänglichkeit innerhalb der Fertigung
- Beanspruchbarkeit der Hüllstruktur durch das befestigte Transportmodul oder das anzuschlagende Betriebsmittel unter Berücksichtigung der geringen D/t-Verhältnisse
- Gewährleistung der Fertigungsschritte, wie z. B. das Drehen auf den Drehvorrichtungen für das Fügen von Sektionen
- Randbedingungen der Lagerung und Zugänglichkeit der Sektionen mit entsprechenden Schnittstellen für ein Transportmodul

Weitere Anforderungen konnten für das Transportmodul im **Bereich der Durchführung von Verlade- und Verbringungsprozessen** definieren werden:

- Anzahl der Anschlagpunkte und erforderliche strukturelle Beeinflussungen des Schwimmkörpers

- Witterungseinflüsse und Zuverlässigkeit des Transportmoduls
- Kollisions- und Verladerandbedingungen
- Lastwinkel-Abhängigkeit der Anschlagpunkte bei Verlade- als auch bei Verbringungsprozessen → statische Tragsicherheit
- Berücksichtigung des Masseschwerpunkts des Schwimmkörpers, sodass eine Überlastung einzelner Transportmodule ausgeschlossen werden

Das ursprüngliche Ziel des Technologiekomplexes war es in Zusammenarbeit mit NSD ein ganzheitliches Transportmodul zu entwickeln, dass u. a. auch für das Kranen der FOWF von Installationsschiffen eingesetzt werden kann. Im Entwicklungsprozess konnte durch umfassende Analysen und Berechnungen durch NSD gezeigt werden, dass unter Berücksichtigung des Strukturgewichts von FOWF die Anforderungen des Transportmoduls aus struktureller Sicht nicht erfüllt werden können. Die Konsequenz war seitens des Projektpartners ein Überdenken des Prozessablaufs für das Zuwasserlassen der Floating-Struktur. Dies mündete in einer ganzheitlichen Betrachtung eines Stapellauf-Prozesses mit der dafür erforderlichen Peripherie.

Im Hause EEW SPC wurde innerhalb des Vorhabens der Fokus auf Methoden zum Handling einzelner Sektionen sowie dem Transport der Strukturen mittels Schwerlastfahrzeugen gelegt. Dahingehend wurden Technologieentwicklungen zu sowohl geschweißten als auch geschraubten Anschlagkonstruktionen, s. g. Padeyes durchgeführt (vgl. Abbildung 26). FE-Simulationen, die in der Arbeitsumgebung ANSYS Workbench erfolgten, konnten die Eignung der Technologien für das Heben und Verbringen einzelner Sektionen bestätigen. Durch nachgelagerte Untersuchungen wurden die entwickelten Technologien in die Arbeitsumgebung zur Fertigung maritimer Großstrukturen integriert.

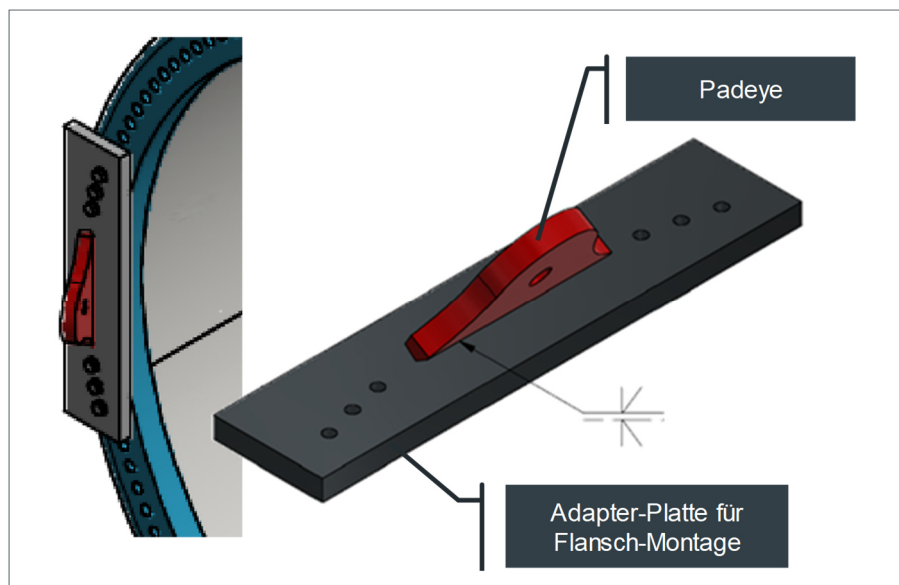


Abbildung 26: Applikation von Padeyes (schraubbare Flansch-Montage) zum Transport von Kopf-Sektionen (Konstruktion und Auslegung)

Neben dem Handling der Sektionen über geeignete Anschlagkonstruktionen war abschließend die Entwicklung eines Transportmoduls Bestandteil der Entwicklungstätigkeiten. Die strukturelle Integrität, die es im Rahmen der Fertigung zu gewährleisten galt, war ebenfalls beim Transport zwischen einzelnen Fertigungsstationen oder auch im Freilager von maßgebender Relevanz. Beim Transport von klassischen Monopiles werden bislang geeignete Abrollsicherungen und Unterlagen vorgesehen, die als Stützstruktur fungieren. Für den Transport von FOWF mit erheblich größeren Durchmessern sind optimierte Transportstrukturen unabdingbar, um während des Transports eine zulässige Beanspruchung zu erzielen. Das Resultat der Technologieentwicklung war eine Methodik, die den Einsatz von lastoptimierten Holzlagern für Schwerlastfahrzeuge ermöglicht.

Auf eine detaillierte und bebilderte Darstellung der entwickelten Betriebsmittel wird aus Gründen der Vertraulichkeit verzichtet.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht entstand im Rahmen eines Verbundvorhabens mit diversen Projektpartnern, welches sich mit der Technologie-Entwicklung für die Fertigung von schwimmenden Offshore-Wind-Fundamenten (FOWF) beschäftigt hat. EEW SPC hat sich im Teilprojekt 1.A mit Entwicklungen unterschiedlichster Betriebsmittel sowie deren virtuellen Erprobung zur Fertigung eben jener Strukturen auseinandergesetzt.

Zu Beginn der Projektarbeit wurde eine Analyse des aktuellen Standes der Technik durchgeführt, woraufhin mit geeigneten Methoden konzeptionelle Ausarbeitungen und Nachweiskonzepte für:

- Lasthebemittel
- Drehvorrichtungen
- Transport- und Lagerequipment

erarbeitet wurden. Die daraus abgeleiteten Lösungsstudien wurden anschließend detailliert, weiterentwickelt und mit geeigneten Methoden die Integration in eine Fertigungsroutine forciert. Abschließend erfolgte eine eingehende Bewertung sowie Prüfung im Hinblick auf firmenspezifische Workflows. Als Resultat konnten erste konstruktive Gestaltungen der Betriebsmittel zur effizienten Fertigung von FOWF abgeleitet werden. Die letztgenannte Tätigkeit stellte zugleich den umfassendsten Bestandteil der Projektarbeit dar, die notwendigerweise auch mit der numerischen Auslegung der Strukturkomponenten verbunden war.

Darüber hinaus fanden methodische Lösungsfindungen zu modulbasierten Transport- und Handhabungstechnologien, fertigungsintegrierten Beschichtungstechnologien und übergeordnete Planungstechnologien in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern statt.

Die erzielten Projektergebnisse liefern somit eine fundierte Basis und umfassende Technologie-Werkzeuge, welche die EEW Special Pipe Constructions GmbH befähigt, die Schnittstellen zur Fertigung schwimmender Offshore-Wind-Fundamente bereitzustellen.

Es gilt im Anschluss an das Vorhaben die Projektergebnisse durch eine enge Zusammenarbeit mit den Unternehmen und Forschungseinrichtungen bedarfsgerecht in die Industriereife zu überführen. Diesbezüglich konnte durch etwaige Patente von Betriebsmitteln und Produktionsmethoden eine umfassende Basis geschaffen werden.

6 Literatur

- [1] **PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG:** *Beschleunigter Ausbau - Mehr Windenergie auf See*; 8. Jul. 2022.
- [2] **WIND EUROPE:** *Floating Offshore Wind - Vision Statement*; Brüssel; Juni 2017.
- [3] **BÖTTCHER, J.:** *Handbuch Offshore-Windenergie*; Oldenbourg Wissenschaftsverlag; 2013.
- [4] **BAUER, J., KREIDER, M., OTERI, F., ROBERTSON, A., CONSTANT, C. und GILL, E.:** *Offshore Wind Energy: Technology Below the Water*; NREL/PR-5000-83142; USA.
- [5] **PROSKOVICS, R.:** *An Introduction to Risk in Floating Wind*; Glasgow; November 2017.
- [6] **ENERGYNEWS:** *übersetzt: Navantia stellt die erste schwimmende Struktur für einen einzigartigen Offshore-Windpark in Schottland fertig* [online] [Zugriff am: 21. November 2022]; Verfügbar unter: <https://www.energynews.es/navantia-participa-la-primera-estructura-flotante-del-mundo-parque-eolico-marino-escocia/>
- [7] **GALICTIO:** *übersetzt: Gerüstmontage am Hywind-Projekt* [online]; 2017 [Zugriff am: 21. November 2022]; Verfügbar unter: <https://www.galictio.com/en/windar-nervion-e-indasa-vuelven-a-confiar-en-galictio-para-el-montaje-de-los-andamios-en-el-proyecto-hywind/>
- [8] **WTWH MEDIA LLC:** *Foundations that float* [online]; 13. Mrz. 2017 [Zugriff am: 21. November 2022]; Verfügbar unter: <https://www.windpowerengineering.com/wp-content/uploads/2017/03/G3-Statoil-cans-in-construction.jpg>
- [9] **EDP ENERGIEAS DE PORTUGAL:** *The WindFloat Project* [online]; 24. Jan. 2013; 24 Januar 2013, 12:00 [Zugriff am: 21. November 2022]; Verfügbar unter: https://www.sintef.no/globalassets/project/deepwind-2013/deepwind-presentations-2013/opening-session/valverde-p_edp.pdf
- [10] **GICON:** *GICON-SOF Fertigungs- und Schweißtechnische Einblicke*; ESG/GICON 2 Fügetechnisches Seminar; 8. Jan. 2014.
- [11] **SPE** [Zugriff am: 8. März 2018]; Verfügbar unter: <https://www.spe.org/en/ogf/ogf-article-detail/?art=3565>
- [12] **RONNIWELL** [Zugriff am: 22. November 2022]; Verfügbar unter: https://turkish.pipeweldingrotator.com/photo/pl17304343-a_r_hizmet_tipi_kaynakl_torna_rulo_konvansiyonel_kaynak_rotatoru_elik_rulo_ile.jpg
- [13] **OFFSHORE WIND:** *First Hywind Scotland Foundation Taking Shape* [online]; 16. Feb. 2016 [Zugriff am: 22. November 2022]; Verfügbar unter: <https://www.offshore-wind.biz/2016/03/18/first-hywind-scotland-foundation-taking-shape/>
- [14] **RECHARGENEWS:** *Masdar joins Statoil in floating wind with 25% Hywind stake* [online] [Zugriff am: 22. August 2018]; Verfügbar unter: <http://www.rechargenews.com/wind/1207411/masdar-joins-statoil-in-floating-wind-with-25-percent-hywind-stake>.
- [15] **RECHARGENEWS:** *In Pictures: Pioneering Buchan Deep floater hulls take shape* [online] [Zugriff am: 22. August 2018]; Verfügbar unter: <https://www.rechargenews.com/wind/in-pictures-pioneering-buchan-deep-floater-hulls-take-shape/1-1-1194588>
- [16] **DNV-GL-SE C401:** *Fabrication and testing of offshore structures*; Hamburg; DNV GL SE; July 2020.

- [17] **RECHARGE:** *Hywind hulls head for hitch-up in Norway* [online]; 2017 [Zugriff am: 7. Dezember 2022]; Verfügbar unter: <https://www.rechargenews.com/wind/hywind-hulls-head-for-hitch-up-in-norway/2-1-81903>
- [18] **WIN-VERLAG GMBH & CO. KG: DIGITAL MANUFACTURING:** *3D-Messung: Scannender Lasertracker auch für große Reichweiten* [online]; 12. Mrz. 2019 [Zugriff am: 4. Januar 2023]; Verfügbar unter: <https://www.digital-manufacturing-magazin.de/impresum/>
- [19] **CARL ZEISS GOM METROLOGY GMBH:** *Quality start with a Q.* [online] - ATOS Q. [Zugriff am: 4. Januar 2023]; Verfügbar unter: <https://www.gom.com/de-de/produkte/3d-scanning/atos-q>
- [20] **SERVO-ROBOT GMBH:** *Bild: Lichtbogennahtverfolgung* [online] [Zugriff am: 21. November 2022]; Verfügbar unter: <https://servo-robot.com/?lang=de>
- [21] **HENNIG, A.:** *Entwicklung eines Tools zur automatisierten Ableitung von Baumethodiken aus CAD-Daten*; Masterarbeit; Rostock; 20. Jul. 2020.
- [22] **GOLDHOFER, C.:** *Entwicklung eines Tools zur ganzheitlichen quantitativen und qualitativen Bewertung maritimer Produktionsstandorte*; Masterarbeit; Rostock; 26. Mrz. 2020.