

Das Wertschöpfungspotenzial der Flugwindenergie in Deutschland

Eine Studie für Airborne Wind Europe

Oktober 2025



DIW Econ GmbH

Anton-Wilhelm-Amo-Straße 58
10117 Berlin

Kontakt:

Dr. Lars Handrich

Telefon +49.30.20 60 972 - 0

Fax +49.30.20 60 972 - 99

service@diw-econ.de

www.diw-econ.de

10. Oktober 2025

Hinweis: Die originale Studie wurde von DIW Econ auf Englisch verfasst. Die vorliegende deutsche Fassung wurde von Airborne Wind Europe erstellt. Im Zweifelsfall ist die englische Fassung maßgebend (publiziert auf <https://airbornewindeurope.org>).

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Flugwindenergie-Technologien	2
3.	Wirtschaftliche Auswirkungen potenzieller Investitionen in FWE	3
3.1	Methodik und Daten	3
3.2	Investition in FWE.....	6
3.3	Wirtschaftliche Auswirkungen von FWE-Investitionen	8
4.	Diskussion über die Einführung von FWE.....	10
4.1	Mögliche Auswirkungen des FWE-Ausbaus.....	10
4.2	Potenzieller Beitrag über FWE-Investitionen hinaus.....	14
4.2.1	Industrielandschaft und regionale Wertschöpfungsketten	14
4.2.2	Innovation	15 ⁹
4.2.3	Energiesicherheit und -resilienz	17
5.	Schlussfolgerung	20
	Bibliographie.....	22
Annex A.	Überblick über FWE-Technologien	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Eine Auswahl von FWE-Geräten im Flug.....	2
Abbildung 3-1: Gesamteffekte aus FWE-Investitionen als Summe aus direkten, indirekten und induzierten Effekten	4
Abbildung 3-2: Schaffung von indirekter Wertschöpfung entlang der Wertschöpfungskette	6
Abbildung 3-3: Gesamtinvestition für 1 GW FWE-Kapazität und Kostenanteil Deutschlands, Mio. EUR	7
Abbildung 3-4: Kostenstruktur der FWE-Investitionen nach IO-Sektoren	8
Abbildung 3-5: Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte je 1 GW FWE-Kapazität	9
Abbildung 4-1: Szenarien des kumulierten Ausbaus der installierten Leistung in Deutschland bis 2035, GW	11
Abbildung 4-2: Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenzial nach Einsatzszenario.....	13
Abbildung 5-1: Potenzielle FWE-Arbeitsplätze im Vergleich zu den Beschäftigungseffekten von Onshore-Wind in Schleswig-Holstein	21
Abbildung A-1: Überblick über FWE-Technologien.....	27

1. Einleitung

Flugwindenergie (FWE) verwendet Flügel oder Drachen, die mit einem oder mehreren Seilen an einer Bodenstation verbunden sind, um Windenergie in Höhen von bis zu 750 Metern zu nutzen. In diesen Höhen sind die Windgeschwindigkeiten höher und die Bedingungen stabiler als in den Höhen, die Windkraftanlagen typischerweise erreichen. Mit besserer Windverfügbarkeit, deutlich geringerem Materialbedarf und einfacherer Logistik im Vergleich zu Windkraftanlagen ist FWE eine wichtige Ergänzungstechnologie zu herkömmlichen Wind- und Solarenergietechnologien.

Obwohl sich FWE noch in der Anfangsphase der Einführung befindet, wird ihr ein großes Potenzial zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit Europas zugeschrieben, da viele FWE-Entwickler und Start-ups derzeit in Europa, einschließlich Deutschland, ansässig sind. Die Politik in Deutschland hat einige Schritte unternommen, um FWE anzuerkennen und zu fördern. So wurde die Technologie in die Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) 2024 aufgenommen, und der Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung (CDU, CSU & SPD 2025) verpflichtet sich, die FWE als eine der innovativen grünen Technologien zu unterstützen. Das Bewusstsein für FWE und den wirtschaftlichen Nutzen der Technologie ist jedoch bisher noch relativ gering.

Um diese Wissenslücke zu schließen und Politik und Öffentlichkeit über die Chancen von FWE und der Produktion von FWE-Systemen in Deutschland zu informieren, werden in dieser Studie die potenziellen wirtschaftlichen Auswirkungen der Entwicklung von FWE in Deutschland bewertet. Diese Studie prognostiziert weder das FWE-Wachstum noch legt sie ein Ziel fest, das erreicht werden soll. Vielmehr werden die potenziellen wirtschaftlichen Vorteile untersucht, die Deutschland erzielen könnte, wenn es die Entwicklung der FWE-Branche ermöglicht und möglicherweise eine Führungsposition in diesem aufstrebenden Bereich sichert.

Im nächsten Abschnitt geben wir einen Überblick über FWE-Technologien. In der Sektion 3 skizzieren wir unseren methodischen Ansatz zur Bewertung der wirtschaftlichen Auswirkungen von FWE und liefern eine Schätzung des potenziellen Investitionsbedarfs pro Gigawatt (GW) FWE-Kapazität. Dabei berücksichtigen wir auch die wirtschaftlichen Auswirkungen von FWE-Investitionen entlang der Wertschöpfungskette. Anschließend diskutieren wir das Potenzial für die Skalierung von FWE und ihren möglichen Beitrag zur Industrielandschaft, zu regionalen Wertschöpfungsketten, zum Innovationsökosystem und zur Energiesicherheit in Deutschland.

2. Flugwindenergie-Technologien

Im Gegensatz zu etablierten Windkraftanlagen mit horizontaler Achse und drei Flügeln kann die Flugwindenergie nicht als eine einzige Technologie beschrieben werden. Vielmehr umfassen FWE-Technologien eine Vielzahl von Designkonzepten, die sich in der Art und Weise unterscheiden, wie Energie erfasst, umgewandelt und in das Netz eingespeist wird. Abbildung 2-1 verdeutlicht dies anhand einer Auswahl von FWE-Systemen. Die verschiedenen Designs beeinflussen die technische Leistung sowie die Auswirkungen auf Wertschöpfungsketten und Einsatzstrategien. Die Hauptunterscheidungen lassen sich anhand von drei Dimensionen treffen: dem Ort der Stromerzeugung, dem Flugmuster und der Art des eingesetzten Flügels.

Abbildung 2-1: Eine Auswahl von FWE-Geräten im Flug



Quelle: Airborne Wind Europe / Mitgliedsfirmen.

In Bezug auf die Stromerzeugung können FWE-Systeme in Technologien eingeteilt werden, die Strom an der Bodenstation erzeugen, und in sogenannte Fly-Gen-Technologien, bei denen Generatoren direkt in dem Fluggerät positioniert werden. Hinsichtlich der Flugbahn des Drachens lassen sich drei Typen unterscheiden: Cross-Wind-Systeme (am häufigsten, sie fliegen schneller als der Wind), statische Systeme und Rotationssysteme. In Bezug auf das Design des fliegenden Flügels oder Drachens können FWE-Systeme textile und halbstarre Drachen oder starre Flügel verwenden. Weitere Details zu den verschiedenen Technologien finden Sie in Annex A.

3. Wirtschaftliche Auswirkungen potenzieller Investitionen in FWE

3.1 Methodik und Daten

Es bestehen nach wie vor erhebliche Unsicherheiten darüber, wie sich FWE in Deutschland und weltweit in den kommenden Jahren entwickeln wird, und die Schätzungen, wie viel FWE-Kapazität in Deutschland bis 2035 installiert werden kann, gehen weit auseinander (siehe Abschnitt 4.1 für weitere Details). Daher bewerten wir die makroökonomischen Auswirkungen der erforderlichen Investitionen für jedes Gigawatt (GW) installierter Leistung in Deutschland, bevor wir die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen in Abhängigkeit vom Kapazitätzubauszenario diskutieren.¹

Für den Investitionsbedarf verwenden wir Daten von FWE-Firmen. Fünf Unternehmen haben Informationen zur Verfügung gestellt zu

- ihre prognostizierten Kapazitätserweiterungen bis 2035;
- ihre voraussichtliche Beschäftigung bis 2035;
- die aktuellen und prognostizierten Kosten ihrer FWE-Technologie;
- die Kostenstruktur ihrer FWE-Technologie nach Komponenten.

Da alle fünf Unternehmen unterschiedliche Technologien repräsentieren, wurden die Gesamtkosten, die Beschäftigung und die Kostenstruktur pro GW Kapazität als gewichteter Durchschnitt aller fünf Technologien berechnet. Auf diese Weise arbeitet die Studie mit einer "durchschnittlichen" Technologie im Mix, die in Zukunft auf dem Markt präsent sein könnte, darunter beispielsweise eine Mischung aus weichen, halbstarren und starren Drachen. Die gesamte projizierte installierte Kapazität wird auch als eines der Kapazitätserweiterungsszenarien in der folgenden Diskussion verwendet. **Da die Studie darauf abzielt, die potenziellen wirtschaftlichen Auswirkungen einer Etablierung der FWE-Industrie in Deutschland zu bewerten, wird davon ausgegangen, dass FWE-Anlagen in Deutschland montiert werden.** Es kann jedoch sein, dass die Komponenten aus anderen Ländern importiert werden. Für die Schätzung der Importquoten für die relevanten Branchen verwenden wir die amtliche deutsche Statistik.

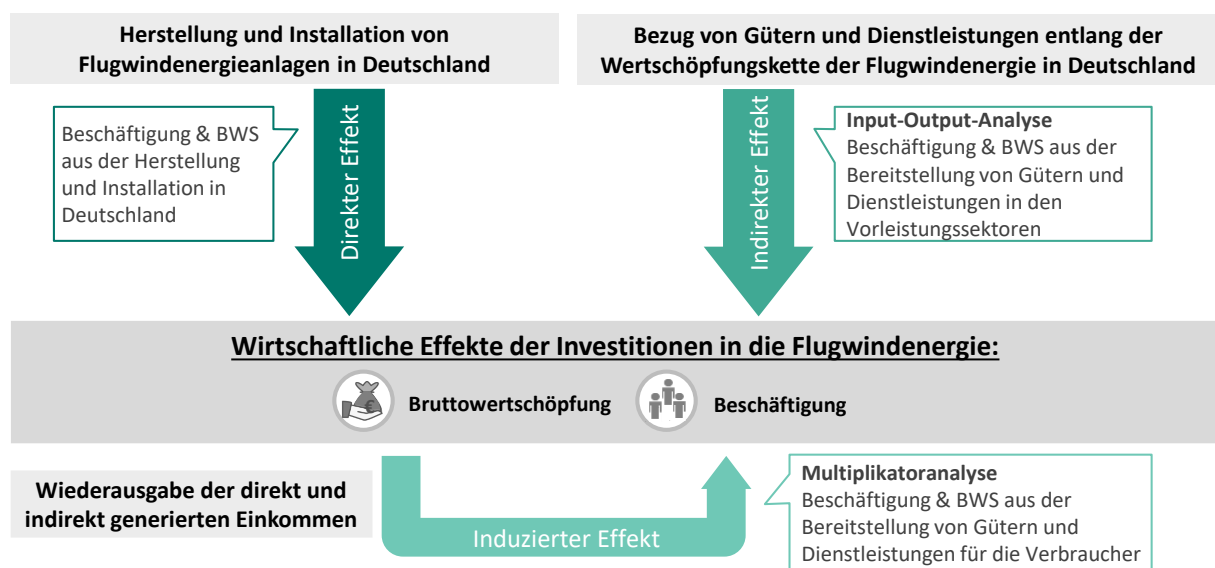
Anschließend verwenden wir Input-Output-Modellierung (IO), um die potenziellen wirtschaftlichen Auswirkungen von FWE-Investitionen in Bezug auf Bruttowertschöpfung und Beschäftigung zu quantifizieren:

¹ Zum Vergleich: 1 GW Leistung entspricht rund 200 modernen Onshore-Windkraftanlagen.

- **Die Bruttowertschöpfung** entlang der gesamten Wertschöpfungskette ist das wichtigste Maß zur Beurteilung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit einer Branche oder Volkswirtschaft. Die Bruttowertschöpfung ist definiert als Output abzüglich der Vorleistungen. Ihre Hauptbestandteile sind Arbeits- und Kapitaleinkommen, d.h. Löhne und Profite.
- **Beschäftigungseffekt:** Die Zahl der Beschäftigten umfasst alle Lohn- und Gehaltsempfänger, geringfügig Beschäftigte sowie Selbstständige und unentgeltlich mithelfende Familienangehörige, unabhängig von der Zahl der geleisteten Arbeitsstunden.

Genauer gesagt ermöglicht die quantitative ökonomische IO-Analyse die Analyse der Interdependenzen zwischen den Sektoren innerhalb der deutschen Wirtschaft. Durch die Nachverfolgung dieser Verflechtungen können wir Lieferketten identifizieren, die mit potenziellen FWE-Investitionen in Deutschland verbunden sind. Dies ermöglicht es uns, die direkten, indirekten und induzierten wirtschaftlichen Effekte zu quantifizieren. Abbildung 3-1 veranschaulicht die gesamtwirtschaftlichen Effekte der FWE-Investitionen in Deutschland.

Abbildung 3-1: Gesamteffekte aus FWE-Investitionen als Summe aus direkten, indirekten und induzierten Effekten



Quelle: DIW Econ.

- **Direkte Effekte** aus FWE-Beteiligungen ergeben sich durch die Installations- und Produktionsaktivitäten in Deutschland, d.h. die Wertschöpfung (Arbeits- und Kapitaleinkommen) und die Zahl der Beschäftigten in den FWE-Unternehmen.
- FWE-Investitionen werden **indirekte Effekte haben**, wenn Vorleistungen, die für die Produktion und Installation von FWE-Systemen erforderlich sind, wie z. B. Dienstleistungen, Maschinen und Ausrüstungen, gekauft werden. Diese Nachfrage schafft wiederum Wertschöpfung und

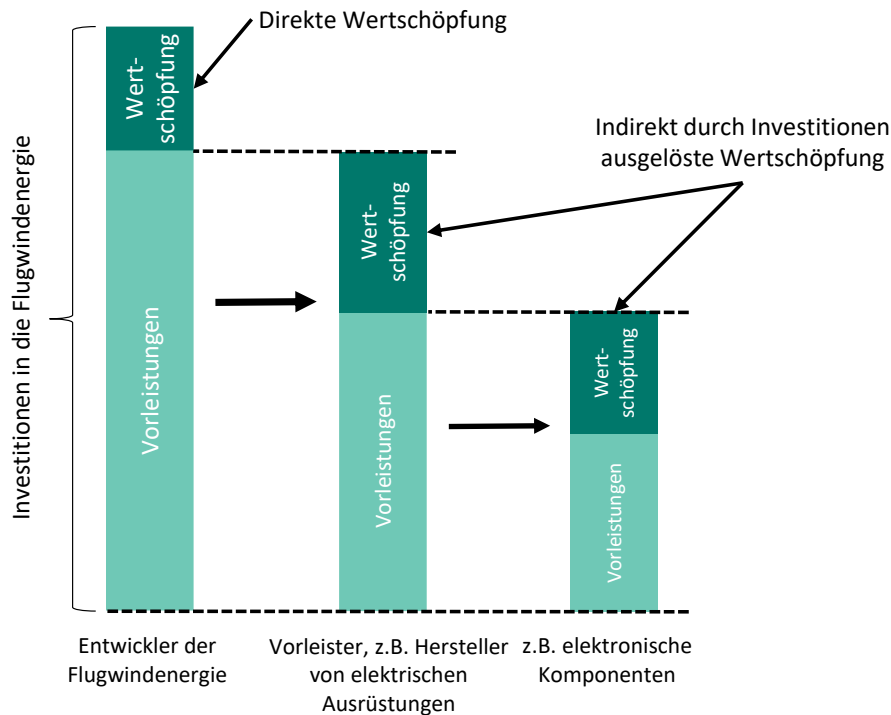
Beschäftigung bei den Zulieferern und deren Zulieferern entlang der Wertschöpfungskette, die somit indirekt mit FWE-Investitionen in Verbindung gebracht werden können. Auf diese Weise vervielfacht sich der initiale Impuls von Investitionen in Deutschland.

- **Induzierte Effekte** entstehen, wenn Arbeits- und Kapitaleinkommen von FWE-Entwicklern und -Produzenten (direkter Effekt) und deren Zulieferern (indirekter Effekt) für andere Güter und Dienstleistungen ausgegeben werden.

Wertschöpfung entlang der Wertschöpfungskette: Abbildung 3-2 zeigt, wie direkte und indirekte Wertschöpfungseffekte entlang der Wertschöpfungskette eines FWE-Investments entstehen. Wenn FWE-Entwickler ihre Systeme installieren, fallen Arbeitskosten an, die einen direkten Mehrwert darstellen.² Sie müssen auch Komponenten für das System kaufen, wie z. B. elektronische Geräte, Maschinen und Drachenmaterialien. Die Kosten für diese Komponenten werden aufgeteilt zwischen der Wertschöpfung des Komponentenherstellers und den Kosten für Zwischenprodukte weiter oben in der Wertschöpfungskette. So würde beispielsweise ein Hersteller von elektronischen Geräten die Nachfrage nach elektronischen Produkten, Metallprodukten und Transportdienstleistungen erhöhen. Die Investition in ein FWE-System schafft somit eine zusätzliche Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen entlang der gesamten Produktionskette. Ein gewisser Teil der daraus resultierenden Mehrproduktion stellt Einkommen, d.h. Wertschöpfung, dar, die indirekt mit der FWE-Investition in Verbindung gebracht werden kann. Je nach Anlagestruktur und Wirtschaftsstruktur können sich diese zusätzlichen Einkommen auf Beträge kumulieren, die mit der Investition selbst vergleichbar sind.

² Die Gewinne der FWE-Entwickler würden auch eine direkte Wertschöpfung darstellen. Da wir jedoch keine Informationen über die erwarteten Gewinne haben und die meisten FWE-Entwickler Start-ups sind, haben wir sie implizit aus unseren Berechnungen ausgeschlossen.

Abbildung 3-2: Schaffung von indirekter Wertschöpfung entlang der Wertschöpfungskette



Quelle: DIW Econ.

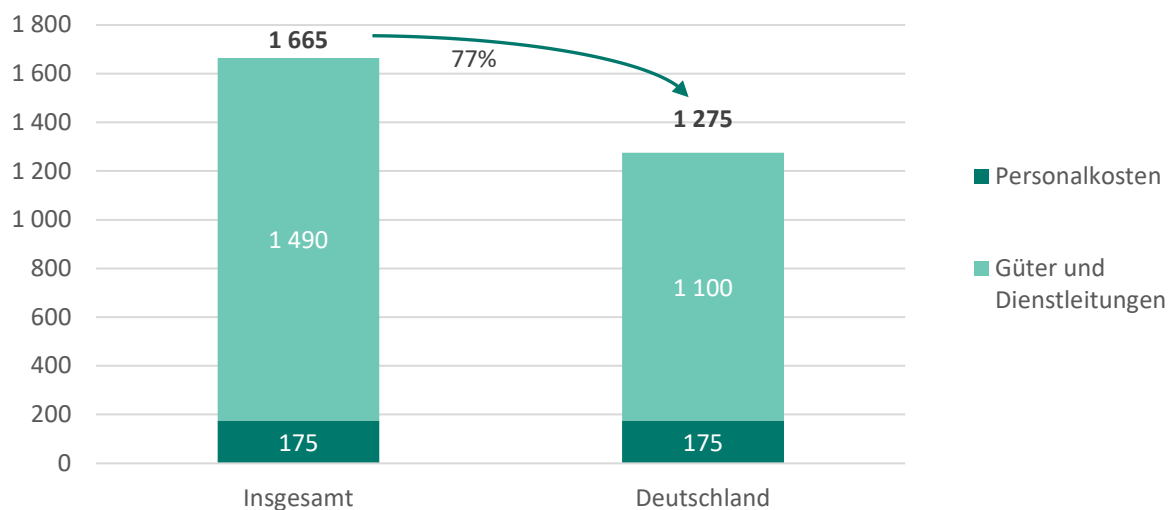
Die Abschätzung der Auswirkungen erfolgt anhand eines vom DIW Econ erstellten ökonomischen Wirkungsmodells. Dieses Modell basiert auf detaillierten IO-Tabellen, die die Verflechtungen innerhalb einer Volkswirtschaft widerspiegeln, einschließlich der Produktströme zwischen der Volkswirtschaft und dem Rest der Welt. In Deutschland werden IO-Konten zentral beim Statistischen Bundesamt (Destatis) geführt. Die deutsche IO-Tabelle enthält wichtige Informationen darüber, wie sich die Angebots- und Nachfrageinputs verschiedener Sektoren aus anderen Sektoren der Wirtschaft auswirken. Daher ist das IO-Modell ein besonders geeignetes Instrument, um die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von FWE-Investitionen in Deutschland zu analysieren und dabei die Interdependenzen zwischen den verschiedenen Sektoren in Deutschland zu berücksichtigen. Die letzte IO-Tabelle, die zum Zeitpunkt der Modellierung verfügbar war, stammt aus dem Jahr 2021.

3.2 Investition in FWE

FWE-Unternehmen gehen davon aus, dass die Kosten ihrer Technologien in den kommenden Jahren deutlich sinken werden, sowohl durch Skalierungs- als auch durch Lerneffekte. **Sie gehen sogar davon aus, dass ihre Technologien bis 2035 die Kostengleichheit mit Windkraftanlagen erreichen oder**

sogar kosteneffizienter werden werden.³ Die geschätzten durchschnittlichen Investitionskosten für verschiedene FWE-Technologien für den Zeitraum 2025-2035 belaufen sich auf rund 1665 EUR/kW oder fast 1,7 Mrd. EUR pro GW installierter Leistung. Vorleistungsgüter (FWE-Systemkomponenten, Installationskosten usw.) machen den größten Teil der Gesamtkosten aus, während die Arbeitskosten, die die direkte Wertschöpfung darstellen, 11 % der Gesamtkosten ausmachen (siehe Abbildung 3-3). Unter Berücksichtigung des potenziellen Imports von Komponenten wird geschätzt, dass rund 77 % der Investitionen direkt in Deutschland getätigt würden.

Abbildung 3-3: Gesamtinvestition für 1 GW FWE-Kapazität und Kostenanteil Deutschlands, Mio. EUR



Quelle: DIW Econ.

Abbildung 3-4 zeigt anhand der IO-Tabellenklassifikation, wie sich die Kosten für Vorleistungsgüter für FWE-Systeme auf die deutschen Wirtschaftssektoren verteilen. Die drei Hauptkostenkomponenten sind: elektrische Ausrüstung (einschließlich Elektronik und Leistungssteuerung); Maschinen (einschließlich Winden und andere mechanische Teile); und sonstige Fahrzeuge (einschließlich starrer Flügel, starrer Strukturen halbstarrer Flügel und Rotoren, falls zutreffend)⁴. Zusammen machen diese Komponenten fast zwei Drittel der Vorleistungsgüter und -dienstleistungen aus.

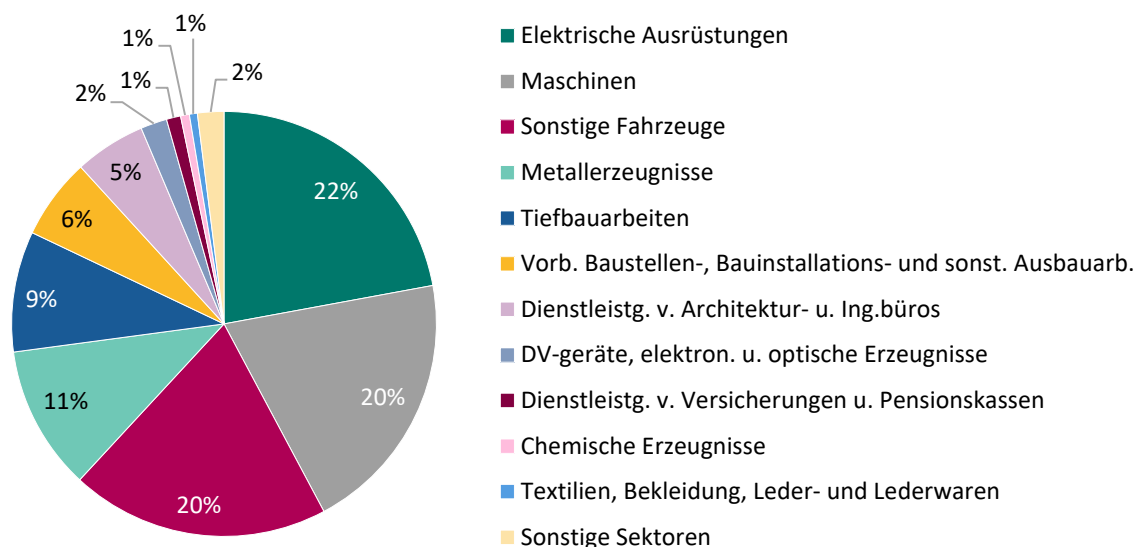
Weitere wesentliche Kostenkomponenten sind Metallerzeugnisse (z. B. der Aufbau der Bodenstation und die Landeplattform), Tiefbautätigkeiten (z. B. Bau- und Vorbereitungsarbeiten auf der Plattform, gegebenenfalls Ausbau von Stromleitungen für den Netzanschluss), spezialisierte Bautätigkeiten (z. B.

³ Die aktuellen Investitionskosten für Onshore-Windenergieanlagen liegen in Deutschland zwischen 1300 und 1900 EUR/kW. Die europäischen Daten deuten darauf hin, dass die Investitionskosten bis 2035 um weitere rund 5 % sinken werden. (Kost, et al. 2024) (Danish Energy Agency 2024)

⁴ Starre Flügel, starre Strukturen halbstarrer Flügel und Rotoren von Fluggeräten fallen in der Europäischen Systematik der Wirtschaftszweige (NACE) unter den "Bau von Luft- und Raumfahrzeugen und zugehörigen Maschinen", d. h. Luftfahrzeugen. Als solche fallen sie in der IO-Tabelle unter den größeren Sektor der "sonstige Fahrzeuge".

die eigentliche Verkabelung und der Anschluss des Systems an das Netz), Ingenieurtätigkeiten (z. B. Planung und Genehmigung), Computer (z. B. Automatisierungssysteme/Bordcomputer), Versicherungskosten, chemische Produkte (z. B. das Seil, das in der Regel aus Polyethylenfasern besteht) und Textilprodukte (z. B. textile Drachen oder textile Abdeckungen für halbstarre Drachen).

Abbildung 3-4: Kostenstruktur der FWE-Investitionen nach IO-Sektoren



Quelle: DIW Econ.

3.3 Wirtschaftliche Auswirkungen von FWE-Investitionen

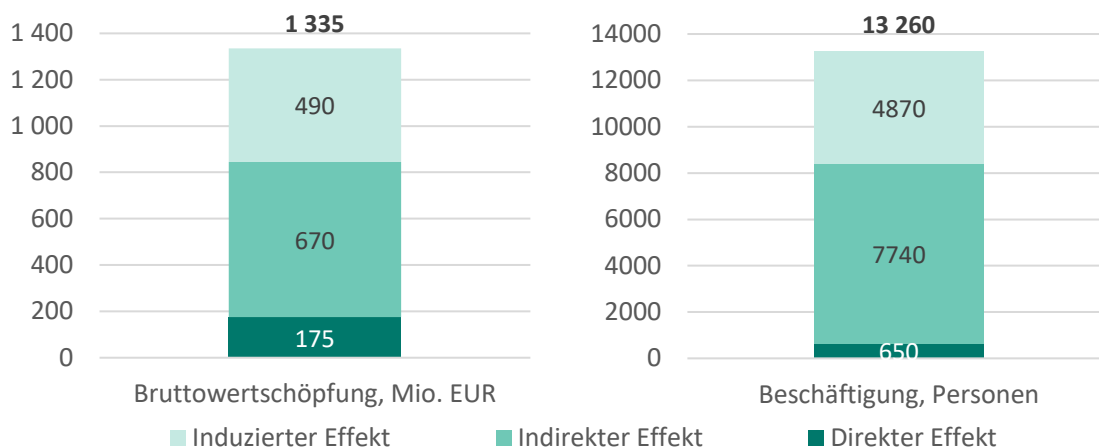
Wenn FWE-Systeme in Deutschland hergestellt werden, könnte die Produktion und Installation von 1 GW FWE-Kapazität in Deutschland eine direkte, indirekte und induzierte Bruttowertschöpfung von rund 1,3 Mrd. EUR generieren (siehe Abbildung 3-5, linker Bereich). Wie oben beschrieben, beziehen sich die direkten Effekte auf jene Wertschöpfung, die von den FWE-Unternehmen geschaffen wird, wenn sie die Systeme (potenziell) montieren und installieren. Indirekte Auswirkungen beziehen sich auf die Herstellung und Lieferung aller zugekauften Komponenten sowie etwaige Fremdleistungen, die gegenüber FWE-Unternehmen für die Planung, Montage etc. erbracht werden. Zu den indirekten Effekten gehören auch Nachfrageeffekte weiter oben in der Wertschöpfungskette.⁵ Die induzierten Effekte beziehen sich auf die Wiederausgabe der erwirtschafteten Einkommen.

⁵ Beachten Sie, dass FWE-Unternehmen in unterschiedlichem Maße an den Installations- und Produktionsprozessen beteiligt sein können. In einigen Fällen konzentrieren sie sich hauptsächlich auf die Entwicklung und Systemplanung und lagern den Großteil der Produktions- und Installationstätigkeiten aus. Die Unterscheidung in der Modellierung zwischen den direkten Auswirkungen bei FWE-Unternehmen und den indirekten Auswirkungen bei Zulieferern gibt daher keinen Hinweis darauf, wie sich die Auswirkungen auf die Installations- und Produktionsaktivitäten aufteilen. Dies gilt auch für Beschäftigungseffekte.

Aufgrund des signifikanten Anteils an Vorleistungsgütern und -dienstleistungen bei FWE-Investitionen dominieren jene indirekten Erträge den Gesamteffekt, welche durch die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen entlang der Wertschöpfungskette generiert werden. Diese indirekt erwirtschafteten Einkommen sind auch der Haupttreiber für die hohen induzierten Effekte. Folglich macht der direkte Effekt, d. h. die geschätzten direkten Arbeitskosten in FWE-Unternehmen, nur etwa 13 % des Gesamtbetrags aus.

Darüber hinaus könnte der Ausbau der FWE-Kapazität um 1 GW bis zu 13.260 Arbeitsplätze schaffen, vor allem innerhalb der Lieferkette und durch die durch Ausgaben generierten Einnahmen (Abbildung 3-5, Diagramm rechts). Mit rund 650 Mitarbeitern pro GW Kapazität ist der direkte Beschäftigungsbedarf in den FWE-Unternehmen im Vergleich zu den indirekten und induzierten Effekten gering und macht nur 5 % der Gesamtwirkung aus. Das bedeutet, dass die wirtschaftliche Wirkung der FWE-Branche bei einem Sitz in Deutschland weit über den eigenen Betrieb hinausgehen würde.

Abbildung 3-5: Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte je 1 GW FWE-Kapazität



Quelle: DIW Econ.

Um diese Zahlen ins rechte Licht zu rücken, ist es interessant, die Beschäftigungseffekte mit den Benchmarks der gut etablierten Windindustrie zu vergleichen. Cameron und van der Zwaan (2015) gehen davon aus, dass für die Installation konventioneller Onshore-Windkraftanlagen zwischen 500 und 6.700 Mitarbeiter pro GW Kapazität erforderlich sind (Median: 2.000 Mitarbeiter), obwohl diese Zahl in den letzten zehn Jahren aufgrund von Skaleneffekten und Lerneffekten etwas gesunken sein könnte. **Mit 650 Mitarbeitern liegt der direkte Beschäftigungseffekt von FWE am unteren Ende der Spanne für die Installation konventioneller Windkraftanlagen.** Dies ist nicht verwunderlich, da bei

FWE-Systemen keine umfangreichen Vorarbeiten wie Fundamentbau, Turmmontage oder Montage in großer Höhe erforderlich sind.⁶

Es wird geschätzt, dass durch die Produktion von FWE-Systemen rund 5.000 Arbeitsplätze pro GW Kapazität geschaffen werden, was den indirekten Effekt erster Ordnung darstellt. Dies macht einen erheblichen Teil der gesamten indirekten Auswirkungen aus, wobei weitere 2.740 Arbeitsplätze weiter oben in der Wertschöpfungskette entstehen (vgl. Abbildung 3-5 oben). Cameron und van der Zwaan (2015) schätzen, dass die Herstellung konventioneller Windkraftanlagen zwischen 2.700 und 12.500 Arbeitsplätze schafft, mit einem Median von 4.000. Unsere Schätzung, die auf deutschen Statistiken und Kostendaten von Kost et al. (2024) basiert, deutet jedoch auf einen höheren Wert für Deutschland von etwas mehr als 6.400 Mitarbeitern hin. **Die Beschäftigung in der Produktion von FWE-Systemen ist etwas geringer als in der Produktion von Windenergieanlagen in Deutschland und liegt deutlich in der in der Literatur suggerierten Bandbreite.** Wie bei der Installation ist ein geringerer Beschäftigungsfaktor als bei herkömmlichen Windkraftanlagen zu erwarten, da FWE-Systeme deutlich weniger und/oder kleinere Teile haben, was einen höheren Automatisierungsgrad im Fertigungsprozess ermöglicht. Mit der Ausweitung der Produktion wird sich der Abstand zu konventionellen Windkraftanlagen voraussichtlich weiter vergrößern.

4. Diskussion über die Einführung von FWE

4.1 Mögliche Auswirkungen des FWE-Ausbaus

Noch ist ungewiss, wie schnell der Ausbau der Flugwindenergie in naher Zukunft voranschreiten wird, und es gibt eine Vielzahl von marktwirtschaftlichen und institutionellen Faktoren, die die Entwicklung beeinflussen können. Wir haben zwei Ansätze zur Abschätzung des potenziellen Kapazitätszubaues bis 2035 in Betracht gezogen: basierend auf den historischen Daten zum Ausbau konventioneller Windenergieanlagen und direkt auf der Grundlage von Prognosen der FWE-Unternehmen.

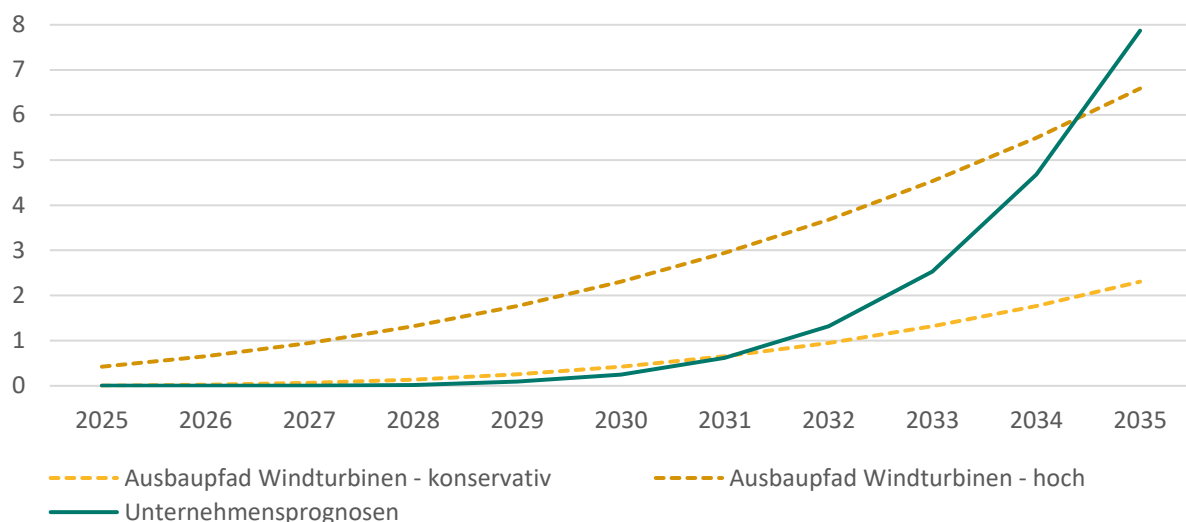
Der erste Ansatz geht davon aus, dass der Ausbau der FWE dem gleichen Weg folgen wird, den die konventionelle Windenergie (Windturbinen) seit Mitte der 1980er Jahre eingeschlagen hat. Wir haben Daten der Internationalen Agentur für Erneuerbare Energien (heruntergeladen von Our World in Data (2025)) verwendet, um die Kurve des Kapazitätszubaues zwischen 2000 und 2023 unter Berücksichtigung des langsamen Starts zwischen 1985 und 2000 zu approximieren (BVG Associates

⁶ Beachten Sie jedoch, dass, wie oben erörtert, der direkte Effekt nur eine grobe Annäherung an den Einsatz von Installationen ist.

2022). Wir haben diese Kurve dann angewendet, um den potenziellen FWE-Kapazitätswachstum bis 2035 abzuschätzen. Solche Schätzungen sind jedoch empfindlich gegenüber Annahmen, insbesondere wenn davon auszugehen ist, dass sich die Skalierung mit der Zeit beschleunigen wird. **Geht man von 2025 als Startjahr für den FWE-Ausbau aus, könnten in Deutschland bis 2035 rund 2,3 GW installierte Leistung erreicht werden.**⁷ Angesichts der Tatsache, dass es bereits um das Jahr 2020 herum landgestützte FWE-Installationen gab, ergibt sich bei 2020 als Startjahr stattdessen eine kumulierte installierte Kapazität von 6,6 GW bis 2035 (siehe Abbildung 4-1). Wir betrachten dies als die Obergrenze für den historisch datenbasierten Ansatz.

Aggregiert man die Prognosen der FWE-Unternehmen über ihr Marktwachstum, so ergibt sich ein langsamerer Start, aber eine noch höhere kumulierte installierte Kapazität von etwa 7,8 GW bis 2035. Diese optimistischere Sichtweise basiert unter anderem auf dem wachsenden Interesse an erneuerbaren Technologien, das in den Anfangsjahren der Entwicklung konventioneller Windkraftanlagen nicht vorhanden war. So strebt Deutschland an, sein Stromsystem bis 2035 vollständig zu dekarbonisieren. Da Deutschland aus der Kernenergie ausgestiegen ist, bedeutet dies, dass die Stromerzeugung bis dahin zu 100 Prozent erneuerbar sein müsste. Mit den Vorteilen von FWE in Bezug auf eine höhere Versorgungssicherheit und Flexibilität (siehe Abschnitt 4.2 für weitere Einzelheiten weiter unten) ist es daher nicht unwahrscheinlich, dass FWE schneller skalieren kann, vorausgesetzt, es gibt günstige Anreizstrukturen und institutionelle Rahmenbedingungen.

Abbildung 4-1: Szenarien des kumulierten Ausbaus der installierten Leistung in Deutschland bis 2035, GW



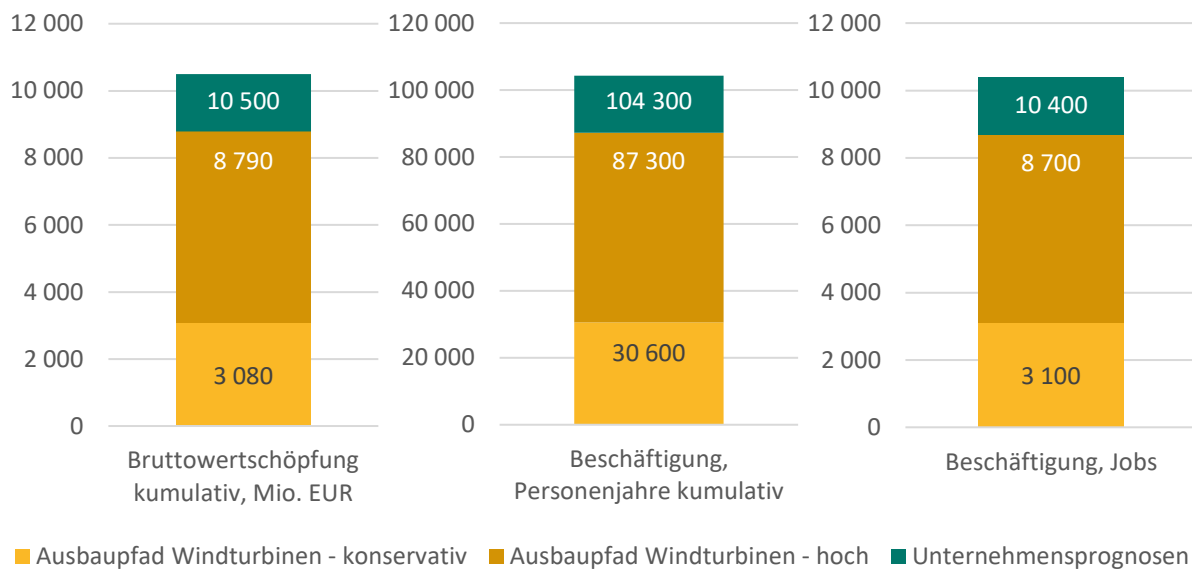
Quelle: DIW Econ.

⁷ In dieser konservativeren Schätzung würde die kumulierte weltweite Kapazität bis 2035 rund 5,9 GW erreichen, was nahe an früheren Berechnungen liegt. (BVG Associates 2022)

Unter Berücksichtigung der industriellen Gesamtkapazität und der aufkommenden FWE-Produktion in Deutschland **scheint plausibel, dass die Produktionskapazitäten möglicherweise ausgebaut werden könnten, um die Produktionsnachfrage zu bedienen, die durch eine solche FWE-Expansion angeregt wird.** Tatsächlich berichten einige FWE-Unternehmen, dass sie versuchen, sich während der frühen Marktentwicklung auf einige wenige oder nur ein Land für die FWE-Einführung zu konzentrieren. Mit den ersten Pilotprojekten stellt Deutschland derzeit einen der potenziellen First-Mover-Märkte dar, obwohl auch ein erhebliches Risiko besteht, dass sich ein anderes Land schneller engagiert und Deutschland im FWE-Markt hinterherhinkt. Deutschland wird daher mit der Konkurrenz aus anderen Märkten konfrontiert sein, unter anderem mit dem wachsenden Interesse an der FWE in China (China Daily 2024, Yuhan 2025). Um die Industrie nach Deutschland zu holen, bräuchte es daher Rahmenbedingungen, die den Zugang zu Finanzmitteln und den Ausbau der heimischen Lieferkette erleichtern.

Wendet man die verschiedenen Ausbauprognosen auf die wirtschaftlichen Auswirkungen pro 1 GW FWE-Kapazität an, wie in Abschnitt 3.3, so zeigt sich, dass **das kumulierte Wertschöpfungspotenzial in den nächsten zehn Jahren zwischen 3,1 Mrd. EUR und 10,5 Mrd. EUR liegt.** Zudem könnte der FWE-Ausbau in diesem Zeitraum 30.600 bis 104.300 Beschäftigungsjahre generieren. Bei der Schätzung der Beschäftigungsjahre wird jedoch nicht berücksichtigt, dass ein durch neue Installationen Anfang 2026 geschaffener Arbeitsplatz durch den zukünftigen FWE-Einsatz während des gesamten Modellierungszeitraums gesichert werden kann. Folglich könnte ein Arbeitsplatz zwischen 2026 und 2035 zehn Berufsjahre ausmachen. Nimmt man den Jahresdurchschnitt, so **könnte der Einsatz von FWE je nach Expansionsszenario etwa 3.100 bis 10.400 direkte, indirekte und induzierte Arbeitsplätze unterstützen.** Das obere Ende dieser Spanne liegt in der Nähe der Gesamtzahl der im Jahr 2018 für den Windenergiesektor an Land geschätzte Gesamtzahl der Arbeitsplätze (einschließlich der Installation und des Betriebs von Windenergieanlagen) für das gesamte Bundesland Schleswig-Holstein, eine der windreichsten Regionen Deutschlands (rund 11.900 direkte, indirekte und induzierte Arbeitsplätze) (DIW Econ 2020).

Abbildung 4-2: Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenzial nach Einsatzszenario



Quelle: DIW Econ.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass der Fokus dieser Studie auf der potentiellen Produktion von FWE-Systemen für die Installation in Deutschland liegt. Mit anderen Worten: **Die Studie geht von dem Ziel aus, eine bestimmte Kapazität zu erreichen, nimmt ferner an, dass diese Kapazität im Inland produziert wird, und quantifiziert die wirtschaftlichen Auswirkungen der jeweiligen Investition in Deutschland.** Würden die Systeme zur Installation nach Deutschland importiert, würden sich die inländischen Wertschöpfung auf die Installationskosten und die damit verbundenen Effekte in der Wertschöpfungskette beschränken.

Ebenso würde ein Szenario, in dem die Produktion so aufgebaut und ausgeweitet wird, dass sie die Ausfuhren von FWE-Systemen in andere Märkte abdeckt, den Rahmen der Analyse sprengen, da dies einen anderen Quantifizierungsansatz unter Berücksichtigung der Erzeugerkosten erfordern würde. Eine Ausweitung der Produktion über die inländischen FWE-Kapazitäten hinaus, um zusätzliche Märkte zu bedienen, würde entsprechend stärkere Impulse für die inländischen Wertschöpfungsketten geben. Einige der Unternehmen, die Daten für diese Studie zur Verfügung gestellt haben, gaben auch ihre erwartete globale installierte Kapazität bis 2035 an. Für diejenigen, die diese Informationen zur Verfügung stellten, schwankte der deutsche Marktanteil zwischen 36 % und 70 %. Die Ansiedlung von Produktionsstätten für den in- und ausländischen Markt an einem Ort würde in den frühen Phasen der FWE-Entwicklung größere Skaleneffekte ermöglichen. **Würden FWE-Unternehmen die Produktion für den Inlands- und Auslandsvertrieb in Deutschland ansiedeln, könnten die Effekte in der Wertschöpfungskette im Vergleich zur reinen Produktion für den deutschen Markt, wie in dieser Studie analysiert, erheblich gesteigert werden.** Es ist jedoch zu beachten, dass die Erhöhung nicht

direkt proportional zur Kapazität sein wird, da bestimmte Tätigkeiten, wie Planung und Installation, zumindest in gewissem Umfang direkt auf dem ausländischen Markt durchgeführt würden.

4.2 Potenzieller Beitrag über FWE-Investitionen hinaus

FWE ist eine innovative Technologie für erneuerbare Energien, die das Potenzial hat, die heimischen Wertschöpfungsketten in Deutschland zu stärken und die Widerstandsfähigkeit und Sicherheit des deutschen Stromsystems zu erhöhen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Onshore- und Offshore-Windkraftanlagen, die auf hohen Türmen und festen Rotorblättern beruhen, verwendet FWE gebundene Drachen oder Fluggeräte, um stärkere und gleichmäßigere Winde in größeren Höhen zu nutzen. Dieser technologische Ansatz bietet industrielle Chancen und Vorteile auf Systemebene und ist damit eine wertvolle Ergänzung zur deutschen Energiewendestrategie. In diesem Abschnitt wird der Beitrag der FWE zu regionalen Wertschöpfungsketten und der Industrie- und Innovationslandschaft in Deutschland genauer untersucht und betrachtet, wie sie die Energiesicherheit beim Übergang des Landes zu einem klimaneutralen Stromsystem verbessern kann.

4.2.1 Industrielandschaft und regionale Wertschöpfungsketten

Wie herkömmliche Windkraftanlagen und Solar-PV sind FWE-Systeme stark dezentralisiert. Der Bedarf an Fachkräften in Installation und Wartung kann daher die **regionale Wirtschaftsentwicklung unterstützen, mit Wertschöpfungs- und Beschäftigungsmöglichkeiten auch in ländlichen Gebieten**, in denen FWE-Systeme zum Einsatz kommen dürften. Anders als z.B. bei der Produktion von Solarmodulen in China hat die aufstrebende FWE-Industrie noch keinen klar dominierenden Produktionsstandort oder -land. Dies bedeutet, dass die FWE-Entwicklung möglicherweise die industrielle Diversifizierung bei der Produktion von sauberen Energietechnologien, fortschrittlichen Materialien, Elektronik und Maschinen in Deutschland unterstützen könnte.

Wie im Abschnitt 3.2 gezeigt, sind die wichtigsten Zulieferbereiche für FWE-Systeme elektrische Komponenten, Maschinen und Transportgeräte. **Alle drei Branchen haben in Deutschland ein starkes Standing und schaffen damit eine gute Basis für den Aufbau heimischer Wertschöpfungsketten für die FWE-Industrie.** So gibt es in Deutschland mehrere Cluster der Elektronikindustrie, darunter ein großes und wachsendes "Silicon Saxony"-Cluster rund um Dresden, wo mehrere Chipfabriken entstehen (Infineon 2025, Weckbrodt 2024). Der Sektor ist daher gut positioniert, um den Bedarf der FWE-Branche an fortschrittlicher Leistungselektronik, Netzintegrationslösungen und anspruchsvollen Steuerungssystemen zu decken. Darüber hinaus bieten die deutsche Luft- und Raumfahrt- sowie die Automobilindustrie fortschrittliches Materialwissen, Leichtbaufähigkeiten und

Hochleistungsfertigungsmethoden, die alle die Produktion von FWE-Drachen und -Flügeln unterstützen könnten.

Der wirtschaftliche Beitrag von FWE-Systemen geht über die anfängliche Produktion und Installation hinaus. Über die gesamte technische Lebensdauer hinweg generieren FWE-Systeme durch Betrieb und Wartung Mehrwert und Beschäftigung.

Im Vergleich zu herkömmlichen Windkraftanlagen haben FWE-Systeme einen etwas höheren Wartungsaufwand, der vor allem auf den Verschleiß von Drachen und Seilen zurückzuführen ist. Das Halteseil, das mechanisch stark beansprucht wird, muss alle zwei Jahre ausgetauscht werden, wobei dies je nach Intensität der Belastung variieren kann. Wichtig ist, dass der Austausch nach Abschnitten und nicht notwendigerweise des gesamten Seils möglich ist, was die Effizienz erhöht und den Abfall reduziert (Wilhelm 2018, Coutinho 2024). In ähnlicher Weise werden textile Drachen und die weichen Abdeckungen von halbstarren Flügeln jährlich ausgetauscht, obwohl textile Drachen auch den teilweisen Austausch bestimmter Komponenten ermöglichen (Coutinho 2024). Die Exoskelette von halbstarren Drachen haben eine Lebensdauer, die kürzer ist als jene des gesamten FWE-Systems (Coutinho 2024).

Zusammengenommen **erzeugen diese Austauschzyklen eine stabile, wiederkehrende Nachfrage nach Hightech-Materialien, Textilien und Ingenieurdienstleistungen**. Wenn diese Materialien und Dienstleistungen aus dem Inland bezogen werden, stellen sie eine große Chance für die deutsche Industrie dar, langfristige Lieferverträge und Serviceverträge abzuschließen. In diesem Sinne sind FWE-Anlagen nicht nur Kapitalinvestitionen, sondern anhaltende Treiber industrieller Aktivität, sie generieren Folgeaufträge, unterstützen spezialisierte KMU und stärken das gesamte industrielle Ökosystem Deutschlands. Darüber hinaus ermöglicht der regelmäßige Austausch von Komponenten die Installation der neuesten Gerätegeneration, was im Wesentlichen ein regelmäßiges Repowering ermöglicht und die Systemeffizienz erhöht.

4.2.2 Innovation

Es gibt mehrere Dimensionen, entlang derer die FWE einen Beitrag zur Innovationslandschaft in Deutschland leisten kann:

- ☐ sektorübergreifende Innovation,
- ☐ Partnerschaften in der angewandten Forschung und in der Industrie,
- ☐ Ökosysteme für KMU und Start-ups,
- ☐ Digitalisierung und KI.

FWE-Technologien liegen an der Schnittstelle zwischen den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Energie, fortschrittliche Materialien und digitale Steuerungssysteme. Sie bündeln Kompetenzen in Leichtbaustrukturen und Aerodynamik aus der Luft- und Raumfahrt, Energieerzeugungstechnologien und Netzintegration aus dem Energiesektor sowie Produkte aus der Elektronik- und IT-Branche für die autonome Steuerung und Systemoptimierung. Diese Technologien berücksichtigen die Wetterbedingungen, die Netzintegration und die mögliche Notwendigkeit von Ausweichmanövern bei der gemeinsamen Nutzung des Luftraums mit anderen Flugzeugen. Fortschritte bei diesen Technologien können auch Spillover-Effekte in andere Sektoren wie autonomes Fahren, Drohnentechnologien und in den Luft- und Raumfahrtsektor unterstützen.

FWE-Technologien befinden sich derzeit im Demonstrationsstadium und bewegen sich auf die Kommerzialisierung zu, so dass **FWE-Projekte oft ein Produkt der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Wissenschaft sind.** Diese Demonstrationsprojekte werden häufig aus nationalen oder europäischen Innovationsfonds finanziert. Ein Beispiel aus Deutschland ist eine Partnerschaft zwischen dem FWE-Entwickler SkySails Power, dem Energieunternehmen EnBW, dem Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik der Leibniz Universität Hannover und dem Offshore-Windberatungsunternehmen Omexom Renewable Energies Offshore. Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie von 2018 bis 2022 gefördert und umfasste den Aufbau einer vollautomatischen Forschungseinheit zur Sammlung von Informationen über den Betrieb, die Optimierung, die Umweltauswirkungen und Sicherheitsaspekte von FWE-Systemen (SkyPower100 2022). Weitere Hochschulen und Forschungseinrichtungen, die sich mit Windenergie, Leichtbau und Mechatronik beschäftigen, sind die RWTH Aachen und die Universität Stuttgart, die beide Mitglied im Branchenverband Airborne Wind Europe sind. Die FWE-Entwicklung kann sowohl die Forschungslandschaft für erneuerbare Energien in Deutschland als auch die Innovationsdiffusion in der Wirtschaft stärken.

Letzteres hängt auch damit zusammen, dass es sich bei den meisten aktuellen FWE-Entwicklern um Start-ups oder Kleinunternehmen handelt, die oft als Spin-offs von Institutionen wie der TU Delft oder der TU Berlin gegründet wurden. FWE-Entwickler und FWE-Lieferketten stellen nach wie vor Nischensektoren an der Schnittstelle von Forschung und industrieller Umsetzung dar. **Die Entwicklung von FWE-Lieferketten bietet Chancen für neue Start-ups** und ermöglicht es bestehenden Unternehmen, sich in High-Tech-Märkte für saubere Energie zu diversifizieren.

Steuerungssysteme sind ein wesentlicher Bestandteil der FWE-Technologien. FWE-Systeme arbeiten autonom und passen die Position des Drachens je nach Windbedingungen, der Situation auf dem Strommarkt und der potenziellen Notwendigkeit, anderen Flugzeugen auszuweichen, an. Dies

erfordert fortschrittliche Steuerungsalgorithmen, Echtzeitüberwachung und vorausschauende Wartung, die von KI unterstützt werden. Das schafft Chancen für die deutsche IT- und Elektronikbranche, gemeinsam an der Entwicklung digitaler Innovationen zu arbeiten. Solche Fortschritte könnten auch auf Drohnen, Logistik und autonome Fahrzeuge übertragen werden, um Spillover-Effekte zu schaffen und die digitale Wirtschaft in Deutschland zu stärken.

4.2.3 Energiesicherheit und -resilienz

Der Übergang zur Klimaneutralität in Deutschland verändert das Energiesystem des Landes. Für die zukünftige Entwicklung des deutschen Energiesystems, insbesondere im Hinblick auf die Stromerzeugung, gibt es verschiedene Szenarien. Einige konzentrieren sich auf realistische Szenarien, die auf aktuellen Trends und bestehenden Politiken basieren (DNV 2025), während andere untersuchen, wie die Transformation aussehen sollte, um bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen (Frömel, et al. 2025, Kopernikus-Projekt Ariadne 2021, Samadi 2022). Beide Arten von Studien beleuchten zwei wichtige Entwicklungen in der Stromerzeugung:

- Die Stromerzeugung muss bis 2045 erheblich steigen, angetrieben durch die Elektrifizierung von Verkehr, Gebäuden und Industrie. Die meisten Studien gehen davon aus, dass sie sich mehr als verdoppeln wird.
- Angesichts der Verfügbarkeit ausgereifter kohlenstofffreier Stromerzeugungstechnologien muss der Stromsektor vollständig dekarbonisiert werden, um die Klimaziele zu erreichen. Das bedeutet, dass die Stromerzeugung vollständig auf erneuerbaren Energiequellen basieren muss.⁸

In dieser politischen und technischen Landschaft **würden erneuerbare Technologien wie FWE einen wesentlichen Beitrag zur Energiesicherheit leisten**. FWE besitzt mehrere einzigartige Eigenschaften, die sie von herkömmlichen Windkraftanlagen und Solar-PV-Anlagen unterscheidet.

Eines ihrer wichtigsten Merkmale ist ihr relativ **hoher Kapazitätsfaktor**⁹. In Deutschland erreichen Solaranlagen in der Regel einen Kapazitätsfaktor zwischen 11 % und 15 % (Kost, et al. 2024), was darauf zurückzuführen ist, dass sie nachts keinen Strom erzeugen können und im Winter eine geringere

⁸ Das Potenzial der gasbefeuerten Stromerzeugung mit Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) wird diskutiert (CDU, CSU & SPD 2025, Stratmann 2025). CCUS ist jedoch energieintensiv, kann nicht alle Emissionen abscheiden und ist noch nicht skalierbar. Es eignet sich daher besser für schwer zu reduzierende Sektoren (z. B. Zementherstellung) neben Emissionssenkern (z. B. Wälder, Moore, Direct Air Capture), um Restemissionen auszugleichen.

⁹ Der Kapazitätsfaktor beschreibt, wie viel Zeit in einem typischen Jahr ein Kraftwerk Strom mit voller Kapazität produziert. Dieser theoretische Indikator normalisiert effektiv Produktionszeiten unterhalb der vollen Kapazität, um ein vergleichbares Maß für die erwartete Stromerzeugung aus einer Kapazitätseinheit über verschiedene Technologien hinweg zu liefern.

Leistung erzielen. Onshore-Windenergieanlagen erreichen je nach Standort Kapazitätsfaktoren zwischen 21 % im deutschen Binnenland und 37 % in windreichen Küstenregionen im Norden des Landes. Offshore-Wind kann Kapazitätsfaktoren zwischen 37 % und 51 % erreichen (Kost, et al. 2024). Schätzungen gehen davon aus, dass der Kapazitätsfaktor von FWE zwischen 35 % und 50 % liegen wird, in Gebieten mit starkem Wind sogar noch höher (Weber, et al. 2021, Malz, et al. 2022, Zillmann and Bechtle 2018). Damit liegt sie auch im Binnenland Deutschlands auf Augenhöhe mit der Offshore-Windenergie und weit über der Photovoltaik. Das macht FWE zu einer sinnvollen Option in Bezug auf die Energieversorgung, insbesondere an Standorten, an denen konventionelle Windkraftanlagen nicht eingesetzt werden können. Durch eine stabile und dezentrale Stromversorgung könnte FWE auch den Netzausbaubedarf reduzieren und damit zur Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems beitragen.

Neben dem Kapazitätsfaktor profitiert FWE auch von **geringere Variabilität** (Vos, et al. 2024). Die stärkeren, stabileren Winde in größeren Höhen ermöglichen es FWE-Systemen, Strom mit weniger Schwankungen zu erzeugen, was sie in die Nähe der Grundlaststromerzeugung bringt. Darüber hinaus können FWE-Systeme die Position der Drachen innerhalb des Seil-Radius anpassen, um die besten Winde einzufangen, was bei festen Windkraftanlagen nicht möglich ist. Diese Anpassungsfähigkeit reduziert die Variabilität weiter und verringert die Belastung für Ausgleichsmechanismen und Speicherlösungen.

Darüber hinaus bietet FWE eine hohe **Flexibilität**. Betreiber können die Leistung anpassen, indem sie die Höhe des Drachens, den Einsatzradius und die Position des Drachens im Wind oder sogar die Größe des Drachens selbst ändern. Die saisonale Optimierung durch den Austausch von Drachen erhöht diese Flexibilität weiter und ermöglicht es Betreibern, sich an wechselnde Wettermuster und Nachfragezyklen anzupassen. Dabei liegt die Leistungsfähigkeit von FWE zwischen konventionellen erneuerbaren Energien wie Windkraftanlagen und Photovoltaik und konventionellen thermischen Kraftwerken, da sie sowohl grundlastfähige als auch flexible Erzeugung bereitstellen kann. Sie kann daher die Energiewende beschleunigen, indem sie andere variable erneuerbare Energiequellen ergänzt und das technische Potenzial der erneuerbaren Energien insgesamt erhöht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die **Anpassung an saisonale Nachfrageschwankungen**. Wie bei der konventionellen Windkraft und im Gegensatz zu Solar-PV wird bei FWE im Winter tendenziell mehr Strom erzeugt, wenn der Bedarf an Heizung und Beleuchtung höher ist. Diese saisonale Ausrichtung reduziert den Bedarf an teuren Lösungen für die Langzeitspeicherung. Sie erleichtert auch die Sektorenkopplung, da der Strombedarf aus Elektromobilität und Wärmepumpen steigt.

Schließlich sind FWE-Systeme **vielseitig einsetzbar**. Sie können in abgelegenen oder bergigen Gebieten installiert werden, in denen der Einsatz konventioneller Turbinen aus logistischen Gründen nicht

möglich ist. Dadurch wird die Stromversorgung dezentralisiert und ein umfangreicher Netzausbau reduziert. Darüber hinaus können sie aufgrund ihrer relativ geringen Größe und ihres geringen Gewichts schnell eingesetzt und versetzt werden, was in bestimmten Märkten sehr geschätzt wird (Weber, et al. 2021). Diese Vielseitigkeit kann die Schaffung eines völlig neuen Marktsegments in der Windenergie mit Miet- oder Leasingmodellen für FWE-Geräte unterstützen (European Commission 2025).

Die systemischen Merkmale der FWE wirken sich direkt auf die Energiesicherheit Deutschlands aus. **Durch die Einbeziehung einer erneuerbaren Energiequelle, die hohe Kapazitätsfaktoren, reduzierte Variabilität und flexible Erzeugungsoptionen bietet, trägt FWE zur Diversifizierung des Strommixes bei.** Dies reduziert die Abhängigkeit von einer einzelnen Technologie und erhöht so die allgemeine Ausfallsicherheit des Systems. Darüber hinaus reduziert FWE regionale Schwachstellen und Netzengpässe durch die Möglichkeit des dezentralen und mobilen Einsatzes. Die Fähigkeit der FWE, eine stetige und flexible Stromerzeugung zu gewährleisten, stellt sicher, dass Deutschland bei der vollständigen Umstellung auf erneuerbare Energien eine zuverlässige Versorgung aufrechterhalten kann.

Während diese Eigenschaften für den technischen Beitrag der FWE zum deutschen Energiesystem wichtig sind, sind die Kosten, zu denen die FWE Strom liefern kann, ein weiterer wichtiger Faktor. Die **Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Energy – LCOE)** sind eine nützliche Kennzahl, um die Kosten verschiedener Stromerzeugungstechnologien konsistent zu vergleichen. Diese Kennzahl drückt die durchschnittlichen Kosten für die Erzeugung einer Stromeinheit (z. B. in EUR/MWh) über die Lebensdauer eines Kraftwerks aus. Er berücksichtigt alle relevanten Aufwendungen wie Kapitalinvestitionen, Finanzierung, Betrieb und Wartung, Kraftstoff (falls zutreffend) und Stilllegung. Durch die Division dieser Lebenszykluskosten durch die insgesamt zu erzeugende Strommenge ermöglicht der LCOE politischen Entscheidungsträgern und Investoren, die Kosteneffizienz verschiedener Technologien unter bestimmten Bedingungen zu bewerten.

Die Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energiesystemen sind besonders empfindlich in Bezug auf den Kapazitätsfaktor und den Umfang, in dem sie eingesetzt werden. Für FWE, die höhere Wartungskosten als herkömmliche Windkraftanlagen hat, sind auch die Haltbarkeit und der Austauschzyklus von Seilen und Drachen entscheidende Faktoren. Wenn diese Technologie ausgereift ist und von Skaleneffekten, Lerneffekten und industrieller Integration profitiert, wird erwartet, dass ihre Stromgestehungskosten sinken werden, was ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber etablierten erneuerbaren Energiequellen wie Solar-PV und konventioneller Windkraft verbessert.

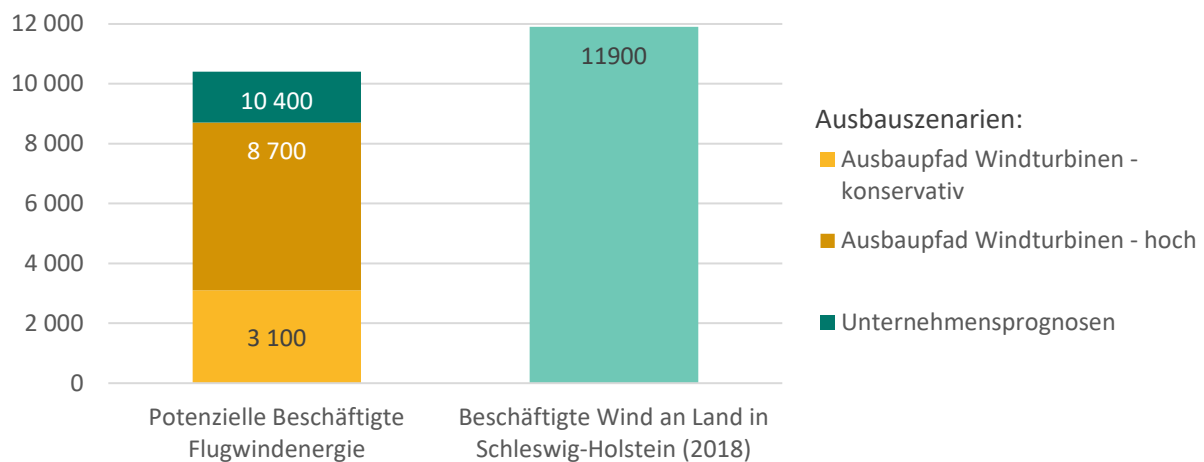
Da sich FWE in einem frühen Entwicklungsstadium befindet und den Einsatz einer breiten Palette von kleinmaßstäblichen Designs erfordert, variieren die Schätzungen der Stromgestehungskosten in Bezug auf das derzeitige Niveau und mögliche zukünftige Entwicklungen erheblich. Die Branchenvertreter in Europa beziffern die Stromgestehungskosten der FWE derzeit auf rund 200 EUR/MWh. Dies ist immer noch deutlich höher als die Spanne für Offshore-Wind (60–134 EUR/MWh), Solar-PV im Versorgungsmaßstab mit Speicher (43–112 EUR/MWh) und Onshore-Wind mit Speicher (38–105 EUR/MWh)¹⁰. Durch Optimierung und Skalierung soll FWE bis 2030 eine Stromgestehungskosten von 25–30 EUR/MWh erreichen (Salari, Zabihi and Murphy 2025). Wenn dies erreicht ist, **könnte FWE zu einer äußerst wettbewerbsfähigen Technologie für erneuerbaren Strom werden** und das gleiche Niveau wie Solar-PV und Onshore-Windkraft, auch ohne Speicher, erreichen.

5. Schlussfolgerung

Die Flugwindenergie könnte Deutschland erhebliche wirtschaftliche Vorteile bringen und gleichzeitig einen positiven Beitrag zur Energiewende leisten. Investitionen in diese Technologie würden das inländische Portfolio an erneuerbaren Erzeugungsoptionen erweitern und die industrielle Aktivität in mehreren strategisch wichtigen Sektoren stimulieren, wie z. B. der Produktion von elektrischen Komponenten, Maschinen und Verkehrs-/Luftfahrttechnologien. Deutschland verfügt in diesen Bereichen bereits über eine starke Wettbewerbsposition. Durch die Verankerung der Entwicklung von FWE in diesen Sektoren könnte das Land hochwertige Arbeitsplätze schaffen und die industrielle Aktivität langfristig sichern. Die Berechnungen dieser Studie deuten darauf hin, dass der Aufbau einer FWE-Industrie im Inland pro Gigawatt installierter Leistung rund 13.300 Arbeitsplätze sichern und eine Bruttowertschöpfung von etwa 1,3 Mrd. EUR generieren könnte. Je nach FWE-Entwicklungspfad könnte der kumulierte Wertschöpfungseffekt in den nächsten zehn Jahren zwischen 3,1 Mrd. EUR und 10,5 Mrd. EUR liegen. Ein konsequenter Ausbau in Deutschland könnte zudem durch Multiplikatoreffekte entlang der Lieferketten in den nächsten zehn Jahren 30.600 bis 104.300 Arbeitsjahre oder durchschnittlich 3.100 bis 10.400 Arbeitsplätze sichern. Im oberen Bereich sind die Auswirkungen vergleichbar mit den direkten, indirekten und induzierten Beschäftigungseffekten der Windenergie an Land im windreichen Schleswig-Holstein im Jahr 2018 (Abbildung 5-1). Wiederkehrende Anforderungen an Betrieb und Wartung stellen sicher, dass dieser Effekt nicht auf die Installationsphase beschränkt ist, sondern die Wertschöpfung und die Schaffung von Arbeitsplätzen über die gesamte Lebensdauer des Systems fortgesetzt werden.

¹⁰ Berechnet von Lazard unter Anwendung des aktuellen Wechselkurses von 1 USD = 0.86 EUR.(2025)

Abbildung 5-1: Potenzielle FWE-Arbeitsplätze im Vergleich zu den Beschäftigungseffekten von Onshore-Wind in Schleswig-Holstein



Quelle: DIW Econ.

Aus Sicht der Energiesicherheit ergänzt die FWE den bestehenden Mix aus Wind- und Solartechnologien, indem es einige ihrer wichtigsten Einschränkungen überwindet. Durch ihren höheren Kapazitätsfaktor, die bessere Anpassung an die saisonale Nachfrage und die betriebliche Flexibilität kann sie in einer Weise zur Systemstabilität und -resilienz beitragen, die konventionelle erneuerbare Energien allein nicht erreichen können. In Zukunft, wenn sich das deutsche Stromsystem voraussichtlich mehr als verdoppeln und vollständig aus erneuerbaren Quellen betrieben wird, werden solche Eigenschaften strategisch unerlässlich werden. FWE könnte den Bedarf an kostspieligen Speichern und "Überkapazitäten" von Solar- und Windkraftanlagen verringern und so eine dezentralere Stromerzeugung ermöglichen, insbesondere in Gebieten, in denen konventionelle erneuerbare Energien schwer zu installieren sind.

Über ihre technischen und wirtschaftlichen Beiträge hinaus spielt die FWE auch eine wichtige Rolle in der Innovationslandschaft Deutschlands. Als Technologie, die sich über Luft- und Raumfahrt, Robotik, Materialwissenschaften und Energietechnik erstreckt, fungiert sie als Brücke zwischen verschiedenen Fachgebieten, fördert die interdisziplinäre Zusammenarbeit und generiert Wissensspillover, von denen andere High-Tech-Branchen profitieren können. Sie bietet ein fruchtbares Umfeld für Start-ups und Spin-offs und stärkt das Forschungsökosystem durch Partnerschaften mit Universitäten und Forschungsinstituten.

Um dieses Potenzial zu realisieren, ist jedoch ein günstiges institutionelles Umfeld erforderlich. Dazu gehören die Schaffung klarer regulatorischer Rahmenbedingungen für luftgestützte Systeme, die Umsetzung unterstützender Maßnahmen für Forschung, Demonstration und Ausbau sowie die Schaffung gezielter Anreize zur Förderung der inländischen Produktion und der Entwicklung der Lieferkette. Spezielle Prüfstände und Demonstrationsprojekte können die Sichtbarkeit und das

Vertrauen der Investoren erhöhen, und die Integration von FWE in umfassendere Energie- und Industriestrategien wird die langfristige Stabilität gewährleisten. Eine Abstimmung der Industrie-, Energie- und Innovationspolitik würde es Deutschland ermöglichen, eine heimische FWE-Industrie aufzubauen und die wirtschaftlichen und strategischen Vorteile dieser aufstrebenden Technologie zu nutzen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die FWE Deutschland die Möglichkeit bietet, seinen Mix aus erneuerbaren Energien und die Energiesicherheit zu verbessern sowie seine industrielle Basis und sein Innovationssystem zu stärken. Mit einer frühzeitigen, gut durchdachten Unterstützung könnte FWE zu einem Eckpfeiler einer widerstandsfähigen, nachhaltigen und wettbewerbsfähigen Energiezukunft werden.

Bibliographie

- BVG Associates. 2022. "In die Luft gehen – die Notwendigkeit, die Vorteile der Flugwindenergie für Netto-Null zu nutzen."
- Cameron, L. und B. van der Zwaan. 2015. "Beschäftigungsfaktoren für Wind- und Solarenergietechnologien: Eine Literaturübersicht." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 160-172. doi:10.1016/j.rser.2015.01.001.
- CDU, CSU & SPD. 2025. *Verantwortung für Deutschland: Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 21. Legislaturperiode [Verantwortung für Deutschland: Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 21. Legislaturperiode]*.
https://www.koalitionsvertrag2025.de/sites/www.koalitionsvertrag2025.de/files/koav_2025.pdf.
- China Daily. 2024. *Chinas selbst entwickeltes Luftschiiff erntet Windkraft in Rekordhöhe*. 12. Oktober.
<https://www.chinadaily.com.cn/a/202410/12/WS6709ce66a310f1265a1c7306.html>.
- Coutinho, K. 2024. *Ökobilanz einer Soft-Wing-Flugwindenergieanlage und deren Anwendung in einer netzfernen Hybridkraftwerkskonfiguration*. Delft: TU Delft.
<https://repository.tudelft.nl/record/uuid:55533d19-21e1-4851-bf7c-7f3af008aaaa>.
- Dänische Energieagentur. 2024. *Technologiedaten für Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen*. Februar.
- DIW Econ. 2020. "Die wirtschaftliche Bedeutung der Windenergie an Land in Schleswig-Holstein." Berlin. https://diw-econ.de/wp-content/uploads/1318_DIW-Econ-2020-Wirtschaftliche-Bedeutung-der-Windenergie-an-Land-in-Schleswig-Holstein_3.0.pdf.

- DNV. 2025. "Ausblick Energiewende Deutschland 2025".
- EEG. 2025. *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023)*. Bundesamt für Justiz, 21. Februar.
- Europäische Kommission. 2025. *NAWEP: Nordisches Flugwindenergieprojekt*. https://ec.europa.eu/assets/cinea/project_fiches/innovation_fund/101038892.pdf.
- Frömel, M., F. Sensfuß, B. Lux, G. Deac, W. Männer und C. Luderer. 2025. "Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Treibhausgasneutrale Orientierungsszenarien. Modul Energieangebot." Karlsruhe.
- Infineon. 2025. *Intelligente Energiefabrik*. <https://www.infineon.com/de/regional/dresden/smart-power-fab>.
- Joshi, R., D.v. Terzi und R. Schmehl. 2025. "Systemdesign- und Skalierungstrends in der luftgestützten Windenergie für ein Bodenerzeugungskonzept demonstriert." *Windenergiewissenschaft* 10: 695-718.
- Kopernikus-Projekt Ariadne. 2021. "Ariadne-Report: Deutschland auf dem zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich."
- Kost, C., P. Müller, J.S. Schweiger, V. Fluri und J. Thomsen. 2024. *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. Fraunhofer ISE.
- Lazard. 2025. *Stromgestehungskosten+*. Juni. <https://www.lazard.com/media/uounhon4/lazards-lcoeplus-june-2025.pdf>.
- Malz, E.C., V. Walter, L. Göransson und S. Gros. 2022. "Der Wert der Windenergie aus der Luft für das Stromsystem." *Windenergie* 25: 281-299.
- Unsere Welt in Daten. 2025. *Gesamte Windkapazität*. <https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-installed-wind-energy-capacity-gigawatts>.
- Petrack, K. 2022. *Einführung in die luftgestützte Windenergie*. 2. Februar. https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2024/03/Task_51_AWEurope_Intro_Airborne_Wind_Energy_2022-02-02.pdf.
- Salari, M.E., M. Zabihi und J. Murphy. 2025. "Eine techno-ökonomische Studie über die Nutzung von Windenergie aus der Luft für die Umkehrosmose-Meerwasserentsalzung." *Heliyon* 11 (2).
- Samadi, Sascha. 2022. *Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschuttszenarien für Deutschland*. März. Abgerufen am 25. April 2023.

https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2022/samadi-2022-vergleich-aktueller-klimaschutzszenarien-fuer-deutschland-cr-sci4climatenrw.pdf.

SkyPower100. 2022. *Gemeinsames Forschungsprojekt: SkyPower 100*.
<https://www.skypower100.de/english/>.

Stratmann, K. 2025. *Bau neuer Gaskraftwerke spaltet die Union*. Handelsblatt, 4. August.
<https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/energiewende-bau-neuer-gaskraftwerke-spaltet-die-union/100143086.html>.

Vos, H., F. Lombardi, R. Joshi, R. Schmehl und S. & Pfenninger. 2024. "Die potenzielle Rolle von fliegenden und schwimmenden Windkraftanlagen in der Nordseeregion." *Umweltforschung: Energie* 1: 025002.

Weber, J., M. Marquis, A. Cooperman, C. Draxl, R. Hammond, J. Jonkman, A. Lemke, et al. 2021. *Windenergie in der Luft*. Nationales Labor für erneuerbare Energien.

Weckbrodt, H. 2024. *Baustart für TSMC-Chipfabrik Dresden im 2. Bundesliga Halbjahr 2024 [Baubeginn für die TSMC Chipfabrik in Dresden im 2. Halbjahr 2024]*. Oiger, 7. April.
<https://oiger.de/2024/04/07/baustart-fuer-tsmc-chipfabrik-dresden-im-2-halbjahr-2024/190455>.

Wilhelm, S. 2018. "Ökobilanzierung der Stromerzeugung aus Windenergie aus der Luft." Kapitel 30 in *der Windenergie aus der Luft. Grüne Energie und Technologie*, herausgegeben von R. Schmehl, 727-750. Singapur: Springer. doi:10.1007/978-981-10-1947-0_30.

Yuhan, Nr. 2025. *Der fliegende Windkraftgenerator in Jiangxi bricht Rekorde*. Dialog Erde, 16. Januar.
<https://dialogue.earth/en/digest/jiangxi-airborne-wind-power-generator-breaks-world-record/>.

Zillmann, U. und P. Bechtle. 2018. "Entstehung und wirtschaftliche Dimension der luftgestützten Windenergie." Kap. 1 in *der luftgestützten Windenergie. Grüne Energie und Technologie*, herausgegeben von R. Schmehl, 1-25. Singapur: Springer.

Annex A. Überblick über FWE-Technologien

FWE-Systeme können bezüglich Stromerzeugung in solche eingeteilt werden, die Strom am Boden („ground-gen“) und solche, die Strom in der Luft („fly-gen“) erzeugen:

- **Ground-gen-Systeme** erzeugen Strom an der Bodenstation. Bei diesen Konstruktionen zieht ein Drachen oder Flügel an einem Seil, das mit einer Trommel oder Winde am Boden verbunden ist, die einen Generator antreibt. Während der Auszieh-/Ausroll-Phase wird Energie erzeugt, während der Energieaufwand während der Einzieh-/Aufroll-Phase minimiert wird, indem der Drachen in einer Flugbahn mit wenig Zugkraft zurückgeflogen wird. Die Platzierung schwerer Komponenten wie Generatoren und Umrichter am Boden vereinfacht die Drachen-Konstruktion und Wartung von diesen Systemen.
- **Fly-Gen-Systeme** positionieren Generatoren direkt im Fluggerät. Bei diesen Systemen werden meist Propeller (wie bei Drohnen) genutzt, deren Motoren bei der Stromerzeugung in den Generatormodus geschaltet werden. Die Stromübertragung auf den Boden erfolgt dann über ein leitfähiges Seil. Dieser Ansatz reduziert zwar den Bedarf an großen beweglichen Teilen am Boden, erfordert jedoch leichte Materialien, insbesondere für die Generatoren im Fluggerät. Obwohl die luftgestützten Geräte schwerer sind, können sie eine kontinuierliche Stromerzeugung ermöglichen, da die zyklischen Ein- und Auslaufphasen entfallen, die für Ground-gen-Systeme charakteristisch sind.

Eine weitere wichtige Unterscheidung ist die Flugbahn des Drachens.

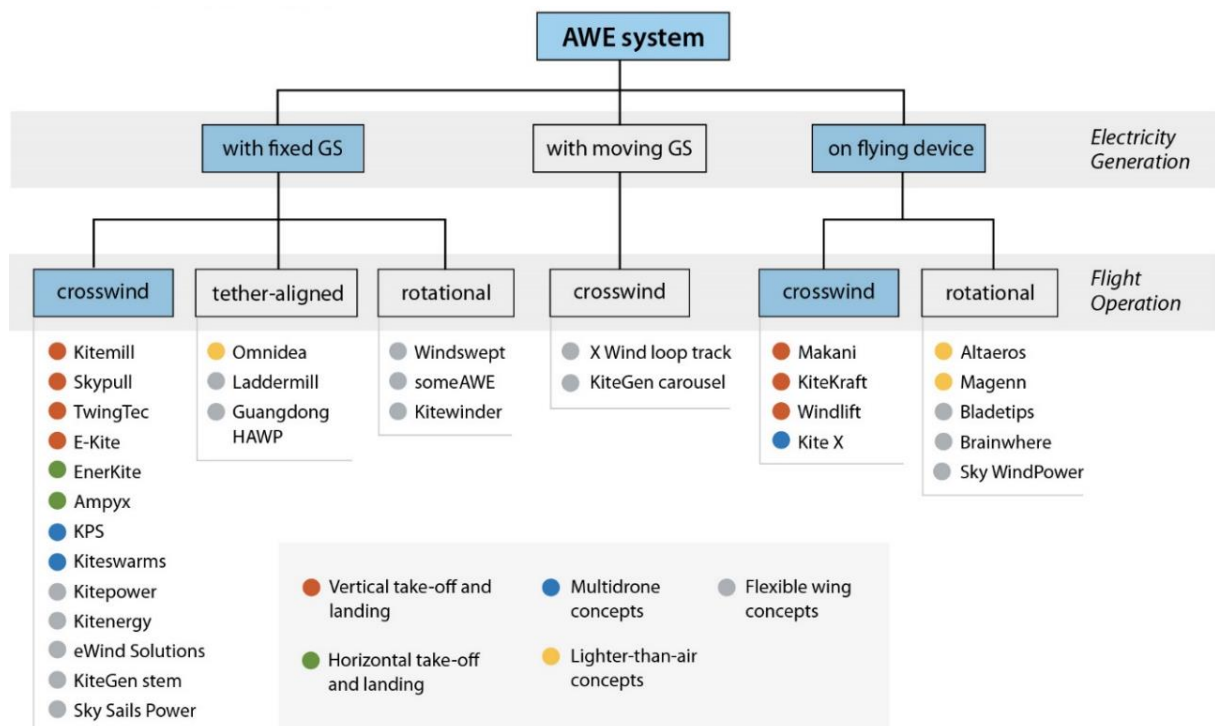
- **Seitenwindsysteme** („cross-wind“) sind am häufigsten, wobei der Drachen schnelle Achten oder kreisförmige Muster senkrecht zum vorherrschenden Wind fliegt. Diese Konfiguration erhöht die scheinbare Windgeschwindigkeit am Drachen deutlich und erhöht dadurch die Leistung.
- **Seil-ausgerichtete Systeme** halten den Kite direkter an der Windrichtung ausgerichtet und erzeugen Auftrieb und Zugkraft, ohne dass schnelle Seitenwindmanöver erforderlich sind. Diese Systeme sind zwar in der Regel weniger leistungsfähig, aber einfacher zu steuern und bieten Vorteile in Bezug auf Stabilität und Zuverlässigkeit.
- **Rotationssysteme** verwenden mehrere Drachen oder Blätter, die an einem Seil oder einer karussellartigen Struktur befestigt sind, die sich unter der Kraft des Windes dreht und einen Generator antreibt. Die Halteseile werden in der Regel durch einen Zugdrachen in Spannung gehalten.

Schließlich unterscheiden sich FWE-Systeme in Bezug auf das fliegende Flügel- oder Drachendesign, das sie verwenden.

- **Softkites / textile Drachen** sind leicht, relativ günstig und flexibel. Sie können durch den Austausch einzelner Abschnitte repariert werden, was die Wartungskosten senkt. Sie sind jedoch weniger steif in der Form, was zu einer geringeren aerodynamischen Effizienz und kürzeren Lebensdauern führt.
- **Halbstarre Drachen** kombinieren textile Abdeckungen mit einem leichten Exoskelett, um ein Gleichgewicht zwischen Flexibilität und Effizienz zu bieten. Sie sind zwar haltbarer als textile Drachen, aber die Abdeckungen müssen regelmäßig ausgetauscht werden, und die Exoskelette müssen möglicherweise nach fünf bis sechs Jahren ausgetauscht werden. (Coutinho 2024)
- **Starre Flügel**, vergleichbar mit denen von Kleinflugzeugen oder Drohnen, bieten höchste aerodynamische Leistung und Haltbarkeit. Sie eignen sich besonders für Fly-Gen-Systeme, bei denen die Turbinen an Bord Stabilität und strukturelle Integrität erfordern. Sie sind jedoch schwerer und teurer und stellen höhere Material- und Fertigungsanforderungen.

Abbildung A-1 bietet einen Überblick über die verschiedenen FWE-Technologien und erweitert die Klassifizierung von Drachenkonstruktionen auf die Art und Weise, wie sie gestartet und gelandet werden.

Abbildung A-1: Überblick über FWE-Technologien



Hinweis: GS steht für Bodenstation.

Quelle: Weber et al. .(2021)