

Ein Framework für die Kreislaufwirtschaft

Die Dekarbonisierung des Energiesektors ist entscheidend für eine klimaneutrale EU, da ein Großteil der Treibhausgasemissionen aus der Energienutzung stammt. Besonders der Windenergiesektor mit seinen hohen Materialkosten steht vor großen Herausforderungen. Der rasante Ausbau der Windenergie erfordert innovative Lösungen, mit denen sich nachhaltige Praktiken im End-of-Life (EoL) Management etablieren lassen. Ein digitaler Entscheidungsrahmen für nachhaltige EoL-Strategien ist daher äußerst nützlich.

Schlüsselwörter

Strategien der Kreislaufwirtschaft, R-Framework, End-of-Life Management, Windindustrie, Windturbinen, Entscheidungsfindungsprozess, Nachhaltigkeit



Dipl.-Ing. Stefanie Eisl arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Universität Wien in der Abteilung für Mensch-Maschine-Interaktion im Bereich Circular Economy.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund ist Professor für Industrial Engineering, Leiter der Forschungsgruppe Mensch-Maschine-Interaktion an der TU Wien und Geschäftsführer der Fraunhofer Austria Research GmbH.

Kontakt

stefanie.eisl@tuwien.ac.at
www.imw.tuwien.ac.at

DOI: 10.30844/I4SD.24.5.90

Turning in Circles

Nutzung des Potenzials der Kreislaufwirtschaft im Betrieb von Windkraftanlagen

Stefanie Eisl und Sebastian Schlund, Technische Universität Wien

Die steigende Anzahl an installierten Windkraftanlagen geht mit einem Anstieg der abgebauten Anlagen einher, der durch die rasante technologische Entwicklung beschleunigt wird. Dies birgt eine besondere Herausforderung im Zusammenhang mit dem End-of-Life Management der Windkraftanlagen, bietet jedoch gleichzeitig erhebliches Potenzial, um den wachsenden Ressourcenbedarf zu decken. Die nachfolgende Publikation stellt einen nachhaltigen Entscheidungsrahmen für mögliche EoL-Optionen von Windkraftanlagen vor, um den Ressourcenkreislauf zu schließen.

für den Windenergiesektor bis 2030 eine jährliche Material Rückgewinnungsrate von 4,75 Millionen Tonnen prognostiziert. Um dieses Potenzial auszureizen, müssen jedoch noch zahlreiche Hindernisse überwunden werden. Gegenwärtig werden die Rentabilität und die Effektivität der EoL-Prakti-

Da 75 % der Treibhausgasemissionen der EU aus der Energienutzung und -erzeugung stammen, stellt die Dekarbonisierung des Energiesektors ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu einer klimaneutralen EU dar [1]. Jedoch ist diese mit einem erheblichen Ressourcendruck verbunden, insbesondere im Windenergiesektor, da Windkraftanlagen deutlich höhere Materialkosten aufweisen als andere erneuerbare Energiequellen (EE). Gleichzeitig bietet die Digitale Transformation eine neue Chance, diese Herausforderungen in Angriff zu nehmen. Es bedarf innovativer Lösungen, die Digitalisierung und nachhaltige Entwicklung miteinander vereint, um den steigenden Ressourcenbedarf zu decken und damit die ehrgeizigen Klimaziele der Europäischen Union zu erreichen [2].

Der Ausbau von Windkraftanlagen (WKA) geht mit einer zunehmenden Stilllegungsrate der Anlagen einher, die durch den raschen technologischen Fortschritt im Windenergiesektor beschleunigt wird [3, 4]. Dies stellt eine große Herausforderung im Zusammenhang mit dem End-of-Life Management der WKA dar, da die großen Strukturen mehr als 25.000 Komponenten enthalten und mehrere tausend Tonnen wiegen [5, 6]. Gleichzeitig kann das richtige EoL-Management dazu beitragen, den steigenden Ressourcenbedarf der erneuerbaren Energien zu decken und ihren Ausbau weiter voranzutreiben. Nach Angaben der Europäischen Umweltagentur [7] wird allein

zur Schließung der Kreislaufwirtschaftslücke durch verschiedene Faktoren eingeschränkt, darunter [8]:

- Begrenzte Erfahrung der Stakeholder (z. B. politische Entscheidungsträger, Industrie, Windparkbesitzer) mit EoL-Optionen und den damit verbundenen Herausforderungen und Chancen
- Unzureichende Lebenszyklusdaten für die Bewertung der Umweltauswirkungen (LCA)

Die umfassende Betrachtung wirksamer Strategien und Bewertung ihrer Umweltauswirkungen ist daher entscheidend, um die sich ergebenden Herausforderung zu bewältigen. Daraus ergibt sich die folgende Forschungsfrage: Wie kann ein nachhaltiger Entscheidungsrahmen für das End-of-Life Management von On-Shore-Windkraftanlagen entwickelt werden, um den Kreislauf zu schließen? Der Mehrwert dieser Publikation besteht erstens in der Identifikation aktueller Forschungslücken in den Bereichen EoL-Management und Umweltbewertung von Windkraftanlagen. Zweitens in der Zusammenfassung der Ergebnisse, zur Ableitung eines digitalen Entscheidungsfindungsrahmens für die Auswahl von EoL-Strategien von On-Shore-Windkraftanlagen.

Daten und Methoden

Die Forschung wurde als Desktop-Studie durchgeführt, um das Potenzial der Kreislaufwirtschaft im Betrieb von Windkraftanlagen, gemäß dem Forschungsziel, zu identifizieren. Die im Rahmen der Literaturrecherche herangezogenen Daten stammen aus der Datenbank Scopus. Schlüsselwörter wie ("end of life" OR "end-of-life" OR "eol"), ("circular economy" OR "CE"), ("concept" OR "strategy" OR "option" OR "method" OR "model"), ("wind" OR "wind turbine"), ("assessment" OR "evaluation" OR "selction") wurden verwendet, was eine Gesamtanzahl von 264 Artikel mit Fokus auf (i) EoL-Praktiken und 94 Artikel mit



Die ORCID-Identifizierungsnummern der Autoren dieses Beitrags sind einsehbar unter <https://doi.org/10.30844/I4SD.24.5.90>

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die die Nutzung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird.

Organisation	Abteilung
Interessengemeinschaft Windkraft (IG Windkraft)	Industrieverband
Technical University of Denmark (DTU)	Akademie
Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)	Akademie
Vestas Wind Systems	Industrie: Hersteller
Püspök	Industrie: Betreiber
Wien Energie	Industrie: Betreiber

Bild 1: Liste der befragten Windenergieorganisationen.

Fokus auf (ii) Umweltbewertung ergab. Mithilfe eines dreistufigen Screening-Prozesses (Titel, Abstract, Volltext) wurden insgesamt 32 peer-reviewed Journalpublikationen, Konferenzbeiträge und Berichte anhand der folgenden Auswahlkriterien ausgewählt: (1) Themenrelevanz (EoL-Management von Windkraftanlagen in Mitteleuropa), (2) Aktualität (veröffentlicht innerhalb der letzten (i) 10 oder (ii) 25 Jahre) und (3) Bedeutung (Verweis auf hochwertige Artikel oder etablierte Quellen). Zusätzliche Erkenntnisse wurden durch Experteninterviews mit wichtigen Akteuren des Windenergiesektors entlang der Wertschöpfungskette gewonnen, wie in **Bild 1** dargestellt. Um eigene empirische Einblicke in die Zusammensetzung österreichischer Windkraftanlagen zu gewinnen, wurde eine statistische Auswertung auf Basis der österreichischen Windparkdatenbank (The Wind Power) [9] durchgeführt.

Aktuelle Forschungslücken

Angesichts des steigenden Rückbau- und Erneuerungsbedarfs in den kommenden Jahren bietet das richtige EoL-Management von Windkraftanlagen ein erhebliches ökologisches und ökonomisches Potenzial. Insbesondere durch die Nutzung energieeffizienter Kreislaufwirtschaftsoptionen wie dem Reuse, Remanufacturing und Refurbishment können, im Vergleich zu den aktuellen Methoden der Entsorgung (von Beton- und Faserteilen) und des energetischen Recyclings (Metallteile), große Mengen an CO₂-Äquivalenten eingespart werden [8, 10]. Um die dargelegten Forschungsziele zu erreichen, bietet der nachfolgende Abschnitt einen Überblick über den aktuellen Wissensstand in den beiden Kerndisziplinen der Forschungsinitiative und zeigt aktuelle Forschungslücken auf. Auf Basis der Scopus-Datenbank wird eine umfassende Literaturrecherche präsentiert, die folgende Themen aufgreift:

- i. Aktuelle EoL-Management Praktiken von Windkraftanlagen
- ii. Optionen für die Messung der Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien

EoL-Managementpraktiken von Windkraftanlagen

Erreicht ein Windpark das Ende seines Lebenszyklus, muss im Rahmen des EoL-Managements der Windkraftanlagen entschieden werden, ob der Betrieb durch Repowering, Life-Time-Extension (LTE) fortgesetzt oder die Anlage stillgelegt werden soll. An diesem Punkt stehen eine Reihe von End-of-Life Optionen zur Auswahl. Traditionell werden die EoL-Optionen in absteigender Reihenfolge, basierend auf der EU-Abfallhierarchie der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) und dem daraus abgeleiteten R-Rahmenwerk der Kreislaufwirtschaft angeordnet [11, 13]. In der Windkraftindustrie ist die Einhaltung dieser hierarchischen Struktur zufolge des R-Rahmenwerks (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle, Recover) jedoch derzeit noch abgänglich, was auf einen mangelnden Konsens in der Windturbinenforschung bezüglich der Definition möglicher EoL-Optionen zurückzuführen ist [8, 14, 15].

Es mangelt an strukturierten Analysen potenzieller EoL-Strategien für WKA sowohl auf politischer als auch im wissenschaftlicher Ebene [8, 14, 18]. Eine erwähnenswerte Ausnahme stellt Velenturf (2021) dar, die einen Überblick über aktuelle Kreislaufwirtschaftsstrategien von Off-Shore-Windkraftanlagen bietet [18]. Die Ergebnisse dieser Arbeit beschränken sich jedoch auf eine ganzheitliche Betrachtung auf der Systemebene der Anlage ohne Berücksichtigung einzelner Komponenten.

Bei der Untersuchung von End-of-Life (EoL) Optionen einzelner Komponenten der Windkraftanlage sind zwei Trends erkennbar. Einerseits wird der Behandlung von Rotorblättern große Aufmerksamkeit in aktueller Forschung und der Politik gewidmet, trotz ihres verhältnismäßig geringen Gewichtsanteils [19, 25]. Andererseits beschäftigt sich die aktuelle Forschung primär mit Recycling, obwohl es sich dabei um eine der am wenigsten bevorzugten Strategien der Kreislaufwirtschaft handelt [10, 14, 25, 27].

– ein Ergebnis, das durch die Arbeit von Eligüzel und Özceylan [16] unterstrichen wird.

Zusammenfassend ergibt sich daraus folgende Forschungslücke in den aktuellen EoL-Managementpraktiken von Windkraftanlagen:

Es fehlt an strukturierten Analysen potenzieller EoL-Optionen von einzelnen Windkraftanlagenkomponenten, jenseits der Rotorblätter, die dem Kreislaufwirtschaft-Rahmen folgen und auf hochwertige R-Strategien jenseits des Recyclings abzielen.

Messung der Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien

Die Quantifizierung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher End-of-Life Optionen ist entscheidend, um wirtschaftlich und ökologisch nachhaltige Entscheidungen zu ermöglichen, die Ressourceneffizienz zu fördern und die gesetzlichen Anforderungen an die Umweltbewertung und das Umweltmanagement zu erfüllen. Zur Quantifizierung dieser Aspekte werden in der Regel Lebenszyklusanalysen (LCA) verwendet [28, 33].

Die traditionelle LCA-Methode hat jedoch verschiedene Einschränkungen:

- Fehlende Anwendung im Kreislaufwirtschaft Kontext [30, 33, 34].
- Zeit- und kostenintensive Implementierung [28, 30, 31]
- Bedarf an umfangreichen Datensätzen und Eingabedaten [28, 31, 35]

Autoren wie Kasner [14], Gennitsaris u. a. [27] und Zhong u. a. [36] verwenden die LCA-Methode zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen ausgewählter EoL-Szenarien von WKA-Komponenten oder verwendeten Materialien. In [14] wird die Umwelteffizienz eines 2-MW-Windparks Vestas V90/105 m untersucht, wobei drei EoL-Szenarien erforscht werden: Stilllegung, LTE und Repowering. Es fehlen jedoch detaillierte Unterscheidungen, wie z. B. die Variation verschiedener Stilllegungsoptionen (Reuse, Repurpose, Recycle usw.). Gennitsaris u. a. [27] bewerten die Umweltauswirkungen verschiedener End-of-Life-Szenarien für die Stilllegung einer Vestas V52 Onshore-Windturbine mittels LCA. Unter Berücksichtigung der bestehenden End-of-Life Behandlungstechnologien für die Materialien der Windkraftanlagen wurden elf Szenarien definiert. Die Szenarien beziehen sich jedoch nicht direkt auf die WKA-Komponenten, sondern auf deren Materialien, und es werden nur eine begrenzte Anzahl von EoL-Optionen berücksichtigt, wobei EoL-Optionen wie das Reuse vernachlässigt werden. In der Arbeit von Zhong u. a. [36] wird die Betrachtung von EoL-Szenarien weiter

eingeschränkt und der Fokus ausschließlich auf das Recycling gelegt. Darüber hinaus befassen sich einige Autoren, darunter Ghosh u. a. [37] und Fayyaz u. a. [38], mit der Quantifizierung der Umweltauswirkungen spezifischer End-of-Life Optionen einzelner Komponenten, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf Rotorblättern gelegt wird [37, 38].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine erhebliche Forschungslücke in der aktuellen Forschungslandschaft in Bezug auf die Quantifizierung der Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien von WKA besteht:

Die Ansätze zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen, die mit verschiedenen EoL-Strategien für Windkraftanlagen verbunden sind, beschränken sich auf eine begrenzte Auswahl an End-of-Life Optionen, die sich überwiegend auf einen Anlagentyp beziehen und nicht auf die Vielzahl an Komponenten (>25.000) einer Windkraftanlage eingehen.

Empirische Erkenntnisse über die Zusammensetzung der österreichischen Windkraftanlagen

Um empirische Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Windkraftanlagen in Bezug auf die Herstellerverteilung, die Anlagentypen und die Größe der Anlagen zu erhalten, wurden statistische Analysen am Beispiel Österreichs durchgeführt.

Die Datenbank enthält Informationen zu 1342 von 1426 Windkraftanlagen, die bis Ende 2023 in Österreich in Betrieb genommen werden. Die österreichische Windindustrie wird in erster Linie von zwei Herstellern dominiert, Enercon und Vestas, die zusammen 84 % der Turbinen ausmachen. Die restlichen 16 % entfallen auf verschiedene Hersteller wie Nordex, Leitwind, GE Energy, Windtec, Siemens und andere. Eine eingehende Untersuchung der Anlagentypen zeigt, dass es in Österreich über 13 verschiedene Modelle von Enercon-Turbinen und 14 verschiedene von Vestas verfügt. Auffällig ist, dass die Enercon E101 mit 307 Installationen und die Vestas V90 mit 127 Installationen als die vorherrschenden Turbinentypen hervortreten (**Bild 2**).

Betrachtet man die jährlich in Betrieb genommenen Anlagentypen und ihre Abmessungen, so zeigt sich ein anhaltender Trend zu größeren Anlagen. Im Laufe der Jahre hat sich der Rotordurchmesser deutlich vergrößert, von etwa 30 Metern Mitte der 1990er Jahre auf bis zu 162 Meter heute.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die österreichische Windturbinenlandschaft durch eine begrenzte Anzahl an Herstellern und eine kleine Auswahl

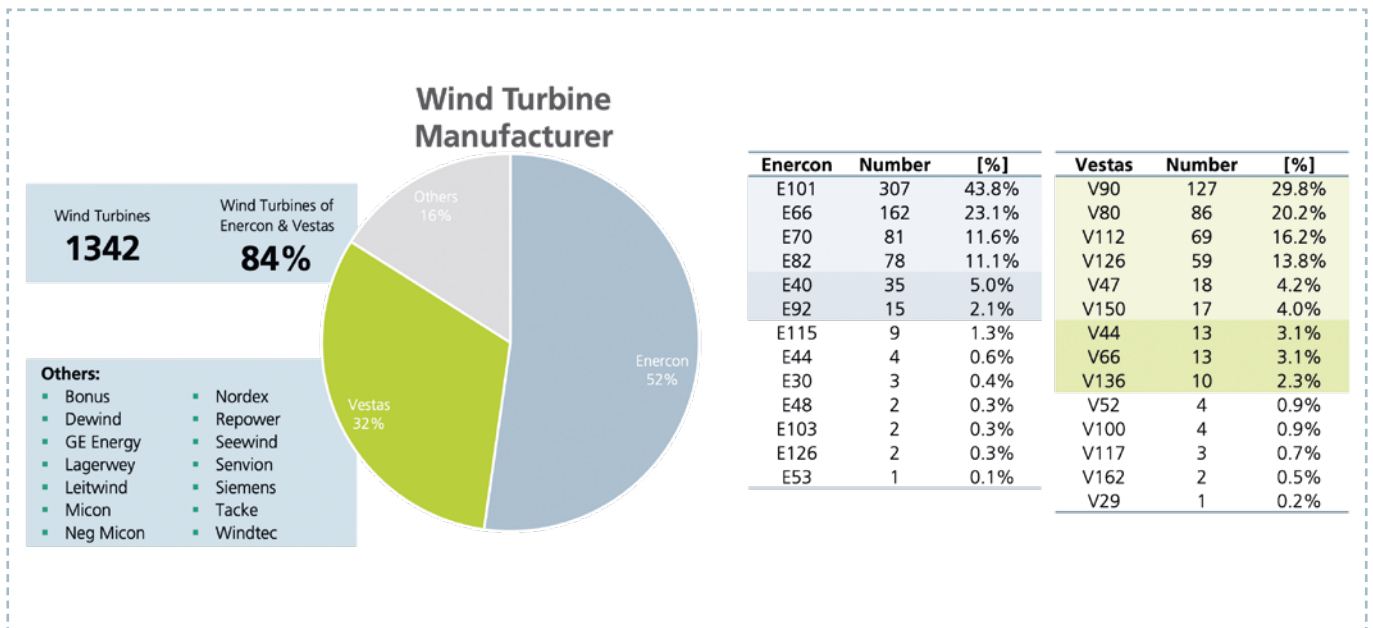


Bild 2: Zusammensetzung der Windkraftanlagen in Österreich.

an Turbinentypen gekennzeichnet ist. Eine Untersuchung von 15 verschiedenen Anlagenmodellen, darunter 6 von Enercon und 9 von Vestas, umfasst 76,4 % (1080 Anlagen) aller Anlagen in Österreich. Darüber hinaus zeigt die Analyse der WKA-Zusammensetzung, dass die Dimensionierung und damit der Materialverbrauch stark vom Rotordurchmesser abhängt, mit einem stetigen Aufwärtstrend, der durch technologische Innovationen und steigende Turbinenleistung getrieben wird [4, 27, 39].

Nachhaltiges Framework zur Entscheidungsfindung

Auf der Grundlage der umfassenden Literaturrecherche, der Experteninterviews und statistischen Analysen wird ein konzeptionelles Modell vorgeschlagen, um die umweltfreundlichste EoL-Option von Windkraftanlagen zu identifizieren und auszuwählen. Der Ansatz kann in drei Phasen unterteilt werden: (1) Produktbeschreibung, (2) EoL-Strategie Auswahl und (3) Umweltbewertung (**Bild 3**).

Im Kontext des End-of-Life Management komplexer Produktstrukturen, wie Windkraftanlagen, erfordert die Entscheidungsfindung ein tiefes Verständnis des komplexen Designs des Produkts, der Eigenschaften der Komponenten, der Materialzusammensetzung und ihrer Wechselbeziehungen. Daher konzentriert sich die erste Phase des Decision Making Framework auf die Analyse und Beschreibung der Windkraftanlage.

Diese Phase beginnt mit einer Analyse der Konstruktionsarten, Hauptkomponenten und Materialzusammensetzungen des Produkts, um eine umfassende Darstellung der Produktstruktur zu erhalten. Idealerweise dienen Stücklisten (BoM) und Montagezeichnungen als Eingabedaten [40]. Sind diese nicht verfügbar, können die vom Hersteller veröffentlichten LCA-Daten verwendet werden. In Anbetracht der Komplexität einer WKA kann ein erweiterter Ansatz gewählt werden, bei dem eine technologiegestützte Regressionsanalyse verwendet wird, um Komponentenvariationen zu berücksichtigen [41]. Das Regressionsmodell bietet die Möglichkeit, den Materialverbrauch aktueller und zukünftiger WKA vorherzusagen und so die Notwendigkeit zu minimieren, für jede Produktvariante individuelle Stücklisten zu analysieren.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der ersten Phase des Decision Making Framework werden in der zweiten Phase verschiedene End-of-Life Alternativen für die Produktkomponenten identifiziert, z. B. durch die Methode der systematischen Literaturrecherche (SLR). Mithilfe eines iterativen Prozesses wird die domänenspezifische Nomenklatur analysiert, um weitere EoL-Strategien aufzudecken, was zu einer Standardisierung der Verfahrensschritte innerhalb jeder Strategie führt [42]. Das Hauptziel dieser Phase ist die systematische Identifikation möglicher Kreislaufwirtschaftsstrategien während des gesamten Produktlebenszyklus.

Abschließend werden die Ergebnisse aus den beiden vorangegangenen Phasen im der dritten Phase integriert,

End-of-Life Decision-Making Framework

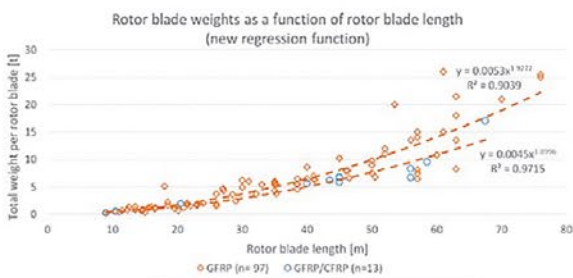
Phase 1: Material Description

Literature Review & Expert interviews

Material Relations [39]

System Component	Component		Material
	Index	Name	
SC1 - Foundation	SC1	Foundation	Concrete, Gravel
SC2 - Tower	SC2	Tower	Steel, Concrete
	C1	Cover	GFRP
	C2	Gearbox	Steel, cast iron
SC3 - Nacelle	C3	Generator	Steel, cast iron, Cu
	C4	Magnet	Nd/Fe/B
	C5	Yaw Control	
SC4 - Rotor	C6	Rotor Blade	GFRP & CFRP
	C7	Rotor Hub	GFRP & CFRP

Regression Model [40]



- Background Research
- Input Decisionmaker
- i ... different components

$$m_i = a x^b$$

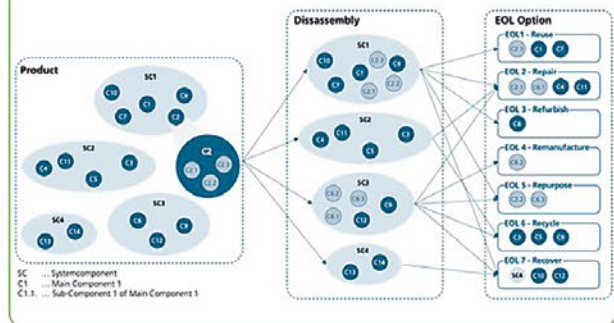
Power Laws

Turbine Specifications

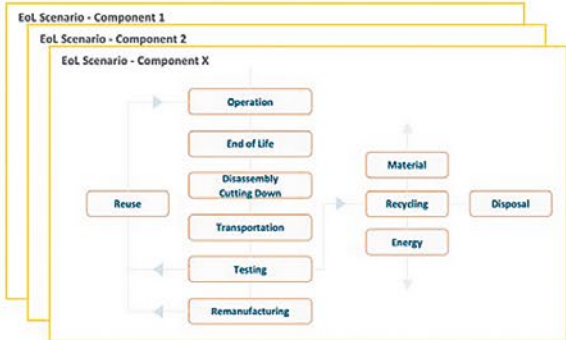
Phase 2: EoL Strategy Selection

Literature Review

End-of-Life Options [42]



Process Analysis of each EoL Option [18]

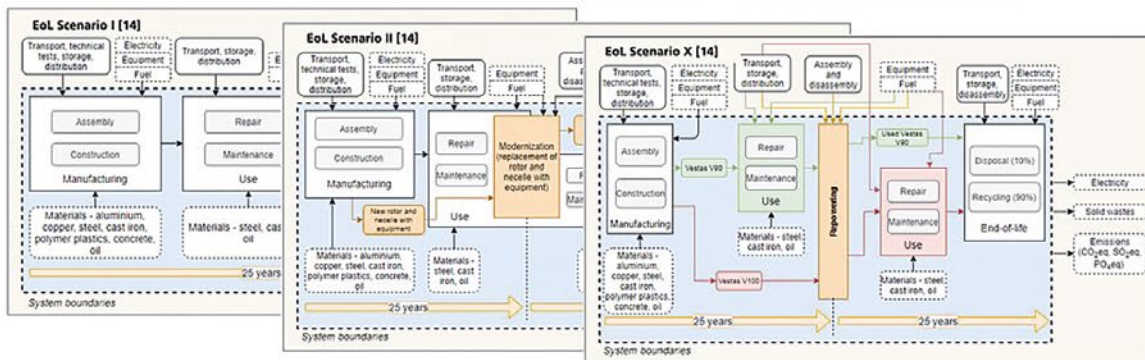


Phase 3: Impact Assessment

Goal, Scope & System Boundaries

Life Cycle Inventory Analyses

Streamlined Circular Life Cycle Assessment Model



Environmental Impact of different EoL Options for each identified component

Bild 3: Vorgeschlagener Entscheidungsrahmen für das Lebensende.

um eine effiziente Quantifizierung der Umweltauswirkungen der einzelnen EoL-Optionen des Produkts und seiner Komponenten zu ermöglichen. Ausgangspunkt hierfür ist die Optimierung des Datenerfassungsprozesses der Ökobilanz unter Verwendung digitaler Technologien wie Künstlicher Intelligenz. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf den Übergang der Modellierung einzelner Lebenszyklen (klassische LCA) zu multiplen kreislauforientierte Lebenszyklen (CE-LCA) gelegt werden.

Mit diesem Ansatz wird eine Quantifizierung der Umweltauswirkungen verschiedener End-of-Life Optionen möglich, welche den Entscheidungsträgern die notwendige Datenbasis liefert, um eine fundierte und nachhaltige Entscheidung über das End-of-Life Management von Windkraftanlagen treffen zu können.

Dringende Herausforderung des EoL-Managements im Windenergiesektor

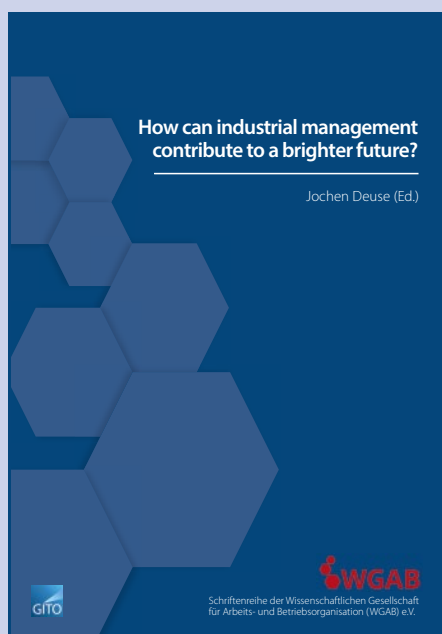
Im Rahmen umfangreicher Forschungsarbeiten wird ein nachhaltiger Entscheidungsrahmen für das EoL-Management von Windkraftanlagen vorgeschlagen. Dieses konzeptionelle Modell leistet einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des komplexen Entscheidungsprozesses bei der Auswahl von EoL-Strategien im Windenergiesektor. Durch die Kombination von Ansätzen der Kreislaufwirtschaft und digitalen Technologien erfolgt ein erster Schritt in Richtung einer langfristig nachhaltigen Energielandschaft. Um die praktische Anwendbarkeit des Modells zu gewährleisten, sind jedoch weitere Forschungsarbeiten erforderlich, wobei der Schwerpunkt auf der kontinuierlichen Zusammenarbeit unterschiedlicher Stakeholder der Windindustrie liegen sollte. Es bedarf an Fortschritten in der Umweltbewertung, insbesondere im Kontext der Kreislaufwirtschaft, um fundierte EoL-Entscheidungen treffen zu können. Angesichts der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Technologie und Industriepraktiken, ist eine kontinuierliche Untersuchung möglicher Kreislaufwirtschaftsstrategien von besonderer Bedeutung.

Literatur

- [1] European Commission: The European Green Deal - Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Region. In: COM 640 Final. Brussels 2019.
- [2] European Commission: Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council. Establishing the framework for Achieving Climate Neutrality and Amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law). In: COM 80. Brussels 2020.
- [3] Breeze, P.: Wind Farms, Electrical Optimization, and Repowering. In: Wind Power Generation. Cambridge 2016, S. 59–65. DOI: 10.1016/B978-0-12-804038-6.00007-4.
- [4] IG Windkraft: Beschleunigung der Windgeschwindigkeit 2023? Große Chancen für die Erneuerbaren im neuen Jahr. 2023.
- [5] Graulich, K. u. a.: Emerging waste streams – Challenges and opportunities. Öko-Institut EV Freiburg. URL: <https://policycommons.net/artifacts/3363067/emerging-waste-streams/4161760/>, Abrufdatum 02.01.2024.
- [6] Mali, S.; Garrett, P.: Life Cycle Assessment of Electricity Production From an Onshore V150–4.2MW Wind Plant. Aarhus 2022.
- [7] European Environmental Agency: Emerging waste streams: Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective. 2021. DOI: 10.1163/9789004322714_cclc_2021-0190-601.
- [8] Woo, S. M.; Whale, J.: A mini-review of end-of-life management of wind turbines: Current practices and closing the circular economy gap. In: Waste Manag. Res. J. Sustain. Circ. Econ. 40 (2022) 12, S. 1730–1744. DOI: 10.1177/0734242X221105434.
- [9] The Wind Power: Austrian wind farms database. URL: https://www.thewindpower.net/country_en_13_austria.php, Abrufdatum: 23.04.2024.
- [10] Andersen, N.; Eriksson, O.; Hillman, K.; Wallhagen, M.: Wind Turbines' End-of-Life: Quantification and Characterisation of Future Waste Materials on a National Level. In: Energies 9 (2016). DOI: 10.3390/en9120999.
- [11] European Commission: Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. In: COM 98 Final. Brüssel 2020. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF
- [12] Potting, J.; Hekkert, M. P.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A.: Circular Economy: Measuring innovation in the product chain. Den Haag 2017.
- [13] Zhang, C.; Hu, M.; Di Maio, F.; Sprecher, B.; Yang, X.; Tukker, A.: An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. In: Sci. Total Environ 803 (2022), S. 149892. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149892.
- [14] Kasner, R.: The environmental efficiency of materials used in the lifecycle of a wind farm. In: Sustain. Mater. Technol. 34 (2022), S. e00512. DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00512.
- [15] De N. P. Leite, G.; Weschenfelder, F.; de Farias, J. G.; Kamal Ahmad, M.: Economic and sensitivity analysis on wind farm end-of-life strategies. In: Renew. Sustain. Energy Rev. 160 (2022), S. 112273. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112273.
- [16] Eligüzel, İ. M.; Özceylan, E.: A bibliometric, social network and clustering analysis for a comprehensive review on end-of-life wind turbines. In: J. Clean. Prod. 380 (2022), S. 135004. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135004.
- [17] Mendoza, J. M. F.; Gallego-Schmid, A.; Velenturf, A. P. M.; Jensen, P. D.; Ibarra, D.: Circular economy business models and technology management strategies in the wind industry: Sustainability potential, industrial challenges and opportunities. In: Renew. Sustain. Energy Rev. 163 (2022), S. 112523. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112523.
- [18] Velenturf, A. P. M.: A Framework and Baseline for the Integration of a Sustainable Circular Economy in Offshore Wind. In: Energies 14 (2021) 17. DOI: 10.3390/en14175540.
- [19] American Clean Power: Decommissioned Wind Turbine Blade Management Strategies. ACP Wind Blade Working Group. URL: https://cleanpower.org/wp-content/uploads/2023/01/ACP_BladeRecycling_WhitePaper_230130.pdf
- [20] Beauson, J.; Laurent, A.; Rudolph, D. P.; Jensen, J. Pagh: The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. In: Renew. Sustain. Energy Rev. 155 (2022) p. 111847. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111847.
- [21] Cong, N.; Song, Y.; Zhang, M.; Wu, W.: Life cycle assessment of carbon reduction potential of EoL wind turbine blades disposal scenarios in China. In: Environ. Impact Assess. Rev. 100 (2023), S. 107072. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107072.

- [22] Karavida, S.; Peponi, A.: Wind Turbine Blade Waste Circularity Coupled with Urban Regeneration: A Conceptual Framework. In: *Energies* 16 (2023) 3, S. 1464. DOI: 10.3390/en16031464.
- [23] Majewski, P.; Florin, N.; Jit, J.; Stewart, R. A.: End-of-life policy considerations for wind turbine blades. In: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 164 (2022), S. 112538. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112538.
- [24] Mishnaevsky, L.: Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions. In: *Materials* 14 (2021) 5. DOI: 10.3390/ma14051124.
- [25] Zhang, W.; Yu, H.; Yin, B.; Akbar, A.; Liew, K. M.: Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling. In: *J. Clean. Prod.* 426 (2023), S. 139184. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139184.
- [26] Cinar S.; Yildirim, M. B.: Reverse Logistic Network Design for End-of-Life Wind Turbines. In: *Optimization and Dynamics with Their Applications: Essays in Honor of Ferenc Szidarovszky*. Matsumoto, A. (Hrsg): Springer. Singapore 2017, S. 225–256. DOI: 10.1007/978-981-10-4214-0_11.
- [27] Gennitsaris, S.; Sagani, A.; Sofianopoulou, S.; Dedoussis, V.: Integrated LCA and DEA approach for circular economy-driven performance evaluation of wind turbine end-of-life treatment options. In: *Appl. Energy* 339 (2023), S. 120951. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120951.
- [28] Balanay, R.; Halog, A.: Tools for circular economy. In: *Circ. Econ. Text. Appar.* 2019, S. 49–75. DOI: 10.1016/B978-0-08-102630-4.00003-0.
- [29] Rigamonti, L.; Falbo, A.; Zampori, L.; Sala, S.: Supporting a transition towards sustainable circular economy: sensitivity analysis for the interpretation of LCA for the recovery of electric and electronic waste. In: *Int. J. Life Cycle Assess.* 22 (2017) 8, S. 1278–1287. DOI: 10.1007/s11367-016-1231-5.
- [30] Rigamonti L.; Mancini, E.: Life cycle assessment and circularity indicators. In: *Int. J. Life Cycle Assess.* 26 (2021) 10, S. 1937–1942. DOI: 10.1007/s11367-021-01966-2.
- [31] Samani, P.: Synergies and gaps between circularity assessment and Life Cycle Assessment (LCA). In: *Sci. Total Environ.* 903 (2023), S. 166611. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166611.
- [32] Van Stijn, A.; Malabi Eberhardt, L. C.; Wouterszoon Jansen, B.; Meijer, A.: A Circular Economy Life Cycle Assessment (CE-LCA) model for building components. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 174 (2021), S. 105683. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105683.
- [33] Vargas-Gonzalez, M. et. al.: Operational Life Cycle Impact Assessment weighting factors based on Planetary Boundaries: Applied to cosmetic products. In: *Ecol. Indic.* 107 (2019), S. 105498. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105498.
- [34] Peña, C. et. al.: Using life cycle assessment to achieve a circular economy. In: *Int. J. Life Cycle Assess.* 26 (2021) 2, S. 215–220. DOI: 10.1007/s11367-020-01856-z.
- [35] European Environmental Agency: Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources. In: *Environ. Issues Ser.* 6 (1998). URL: d557efde1a1ab-1006596c0acb40392bb
- [36] Zhong, Z. W.; Song, B.; Loh, P. E.: LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine. In: *Renew. Energy* 36 (2011) 8, S. 2227–2237. DOI: 10.1016/j.renene.2011.01.021.
- [37] Ghosh, T.; Hanes, R.; Key, A.; Walzberg, J.; Eberle, A.: The Circular Economy Life Cycle Assessment and Visualization Framework: A Multistate Case Study of Wind Blade Circularity in United States. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 185 (2022), S. 106531. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106531.
- [38] Fayyaz, S.; Lund, K. W.; Khoshnevisan, B.; Madsen, E. S.; Birkved, M.: Sustainable end-of-life value chain scenarios for wind turbine blades. In: *Journal of Physics: Conference Series* (2023). DOI: 10.1088/1742-6596/2507/1/012007.
- [39] Scherhauer, S.; Part, F.; Beigl, P.: Das Sekundärressourcenpotenzial aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen. The potential of secondary resources from wind power and photovoltaic plants. In: *Österr. Wasser- Abfallwirtsch.* (2020). DOI: 10.1007/s00506-020-00723-3.
- [40] Lee, H. B.; Cho, N. W.; Hong, Y. S.: A hierarchical end-of-life decision model for determining the economic levels of remanufacturing and disassembly under environmental regulations. In: *J. Clean. Prod.* 18 (2010) 13, S. 1276–1283. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.04.010.
- [41] Volk, R.; Stallkamp, C.; Herbst, M.; Schultmann, F.: Regional rotor blade waste quantification in Germany until 2040. In: *Resour. Conserv. Recycl.* 172 (2021), S. 105667. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105667.
- [42] Feng, Y.; Gao, Y.; Tian, G.; Li, Z.; Hu, H.; Zheng, H.: Flexible Process Planning and End-of-Life Decision-Making for Product Recovery Optimization Based on Hybrid Disassembly. In: *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 16 (2019) 1, S. 311–326. DOI: 10.1109/TASE.2018.2840348.

Anzeige



Deuse, Jochen (Ed.)

How can industrial management contribute to a brighter future?

Industrial management needs to embrace new technologies like virtual reality, Artificial Intelligence, and the Internet of Things. This book shows ways to adopt these new technologies in order to remain competitive.

Print, 202 Seiten
49,90 EUR zzgl. Versand

