



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Simplifizierung von Lebenszyklusanalysen für zirkuläre End-of-Life-Strategien am Beispiel der Vestas V90 Windkraftanlage

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Mensch-Maschine-Interaktion)

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Stefanie Eisl B.Sc.

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung,
Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Laurenz Roth B.Sc.

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

Wien, August 2025

Laurenz Roth



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, August 2025
Laurenz Roth

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt all jenen, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit sowie im Verlauf meines gesamten Studiums begleitet, ermutigt und unterstützt haben. Ohne diese Menschen wäre vieles nicht in der Form möglich gewesen, wie es sich letztlich entfaltet hat.

In erster Linie danke ich meiner Mutter und Werner sowie meinem Vater und Ulrike. Sie haben mir während meiner gesamten Studienzeit stets Zuversicht, Rückhalt und Motivation gegeben. Durch ihre Unterstützung konnte ich nicht nur Herausforderungen bewältigen, sondern auch Chancen wahrnehmen, die meinen Weg an die Universität überhaupt erst ermöglicht haben. Ihr Vertrauen in meine Fähigkeiten und ihr Zuspruch haben mir in schwierigen Momenten die nötige Sicherheit gegeben, um konsequent weiterzugehen.

Ein ebenso herzlicher Dank gilt meinem Erstbetreuer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund sowie meiner Zweitbetreuerin, Dipl.-Ing. Stefanie Eisl. Beide haben sich mit großem Verständnis Zeit für meine Fragen genommen, mich mit wertvollem Fachwissen und klarer Orientierung unterstützt und mir so den nötigen Rahmen für eine zielgerichtete Bearbeitung der Problemstellung gegeben. Besonders schätze ich ihre Geduld und die konstruktive Art, mit der sie meine Arbeit begleitet und mir immer wieder neue Perspektiven eröffnet haben.

Abschließend möchte ich auch meiner Schwester sowie allen Freund_innen und Kolleg_innen danken, die mir in vielfältiger Weise zur Seite standen. Sie haben mich nicht nur tatkräftig unterstützt, sondern sich auch in intensiven Phasen Zeit für mich genommen und mir durch ihre Hilfe im Alltag den Rücken freigehalten. Die Gespräche, Ermutigungen und geteilten Momente haben mir gezeigt, wie wertvoll Gemeinschaft gerade in herausfordernden Zeiten ist.

Allen Genannten gilt mein aufrichtiger Dank – für ihre Unterstützung, ihr Vertrauen und die vielen kleinen und großen Gesten, die diese Arbeit und mein Studium in entscheidender Weise geprägt haben.

Kurzfassung

Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft stellt Österreich vor Herausforderungen. Die Windkraft nimmt dabei eine Schlüsselrolle in der Reduktion von Treibhausgasemissionen ein. Da viele Anlagen nach 20–25 Jahren ihr technisches Lebensende erreichen, rücken Fragen des End-of-Life-Managements zunehmend in den Vordergrund. Ziel dieser Arbeit ist es, zirkuläre End-of-Life-Strategien am Beispiel der Vestas V90 Windkraftanlage einer ökologischen Bewertung zu unterziehen und gleichzeitig eine simplifizierte Methode zu entwickeln, die eine zeiteffiziente und hinreichend genaue Quantifizierung der Umweltauswirkungen am Ende der Betriebsdauer ermöglicht.

Methodisch stützt sich die Arbeit auf eine systematische Literaturrecherche sowie auf die Anwendung der Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040 und ISO 14044. Verschiedene End-of-Life-Szenarien – darunter Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower, Repurpose, Recycling und Recover – wurden auf Komponentenebene (Fundament, Turm, Gondel, Rotor) modelliert und ökologisch bewertet. Zentrales Augenmerk lag auf der Identifikation struktureller Gemeinsamkeiten innerhalb der Analysen, die eine Reduktion des Modellierungs- und Berechnungsaufwands ermöglichen. Auf dieser Grundlage sowie durch gezielte Prozess-Cut-Offs und die Fokussierung auf maßgebliche Einflussgrößen wurde eine simplifizierte Umwelt-Bewertungsmethode dieser End-of-Life-Strategien entwickelt und evaluiert.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass alle untersuchten Strategien unterschiedliche ökologische Potenziale aufweisen. Besonders effektiv erwiesen sich Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower), da sie bei vergleichbarem Ressourceneinsatz die Elektrizitätserzeugung signifikant steigern. Die Strategien der Materialverwertung (Repurpose, Recycle, Recover) zeigten mit Ausnahme des Recyclings des Fundaments ebenfalls positive, wenngleich deutlich geringere Umweltnutzen. Die simplifizierte Methode erwies sich als verlässlich: Selbst bei einer Reduktion der Prozessanzahl um 81,3 % erreicht sie Ergebnisse, die im Durchschnitt zu 98,8 % mit den detaillierten Lebenszyklusanalysen übereinstimmen.

Eine effizientere Ökobilanzierung kann die Entscheidungsfindung in der Industrie unterstützen und die Umsetzung zirkulärer Strategien in der Windkraftbranche erleichtern kann. Der vorgestellte Ansatz versteht sich dabei als Vorschlag, der in zukünftigen Arbeiten weiterentwickelt, getestet und validiert werden sollte. Die Arbeit ist somit als Beitrag zu verstehen, der Impulse für Forschung, Politik und Praxis zur nachhaltigen Gestaltung künftiger Rückbau- und Planungsprozesse geben kann.

Abstract

The transition to a climate-neutral economy presents significant challenges for Austria. Wind power plays a central role in reducing greenhouse gas emissions. As many turbines reach the end of their technical lifetime after 20–25 years, questions of end-of-life management are becoming increasingly relevant. The aim of this thesis is to conduct an ecological assessment of circular end-of-life strategies using the example of the Vestas V90 wind turbine and, at the same time, to develop a simplified method that enables a time-efficient and sufficiently accurate quantification of environmental impacts at the end of the operational phase.

Methodologically, the study builds on a systematic literature review and the application of life cycle assessment according to ISO 14040 and ISO 14044. Various EoL scenarios – including service life extension, reuse, repowering, repurposing, recycling, and recovery – were modeled at the component level (foundation, tower, nacelle, rotor) and evaluated from an ecological perspective. Particular attention was given to identifying structural commonalities across the analyses, allowing for a reduction in modeling and computational effort. On this basis, and through targeted process cut-offs and a focus on key influencing factors, a simplified environmental assessment approach for these end-of-life strategies was developed and evaluated.

The results demonstrate that all strategies examined provide distinct ecological benefits. Measures aimed at extending service life (service life extension, reuse, repowering) proved especially effective, as they significantly increase electricity generation while maintaining comparable resource use. Material recovery strategies (repurposing, recycling, recovery) also showed positive, though markedly lower, environmental contributions, with the exception of foundation recycling, whose environmental impacts remained comparatively minor. The simplified method proved to be reliable: even with an 81.3% reduction in the number of modeled processes, it achieved results that, on average, correspond to 98.8% of those from detailed life cycle assessments.

More efficient life cycle assessment can support decision-making in industry and facilitate the implementation of circular strategies in the wind power sector. The approach presented here is intended as a proposal that should be further developed, tested, and validated in future work. The thesis should therefore be regarded as a contribution that may provide valuable impulses for research, policy, and practice in shaping the sustainable design of future decommissioning and planning processes.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung.....	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	4
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	4
1.2 Forschungsfragen und Ziel der Arbeit	5
1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit	6
2 Theoretische Grundlagen.....	8
2.1 Grundlagen der Kreislaufwirtschaft.....	8
2.1.1 Definition der Kreislaufwirtschaft.....	8
2.1.2 Grundsätze und Prinzipien der Kreislaufwirtschaft.....	10
2.2 Grundlagen der Windkraftanlagen.....	12
2.2.1 Windkraft in Zahlen	13
2.2.2 Aufbau von Windkraftanlagen.....	14
2.2.3 Vestas V90-2.0 MW Windkraftanlage	15
2.2.4 End-of-Life-Strategien von Windkraftanlagen	18
3 State-of-the-Art / Literaturanalyse	23
3.1 Planung des Reviews	23
3.2 Durchführung des Reviews	24
3.3 Deskriptive Analyse	27
3.4 Thematische Analyse	30
3.4.1 Allgemeine EoL-Betrachtung von Windkraftanlagen.....	31
3.4.2 EoL-Betrachtung von Rotorblättern.....	35
3.4.3 Details zur LCA-Methodik von Windkraftanlagen.....	41
3.4.4 Forschungslücke	43
3.4.5 Erkennbare Trends	44
4 Verwendete Methoden	45
4.1 Systematische Literaturrecherche	45
4.2 Forward und Backward Reference Searching	47

4.3	Lebenszyklusanalyse	47
4.3.1	Die Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040 & ISO 14044	48
4.3.2	Software und Datenbanken in der Lebenszyklusanalyse.....	53
5	Umsetzung / Implementierung	56
5.1	Zielsetzung & Szenarien der Lebenszyklusanalysen.....	56
5.2	Datengrundlage und Datenaufbereitung.....	58
5.2.1	Materialliste der Vestas V90	58
5.2.2	Standort der Windkraftanlage und Systemgrenzen.....	58
5.3	Life Cycle Inventory (LCI) der Szenarien.....	59
5.3.1	Struktur des Life Cycle Inventory (LCI)	59
5.3.2	Lebensdauererweiterung	64
5.3.3	Reuse	68
5.3.4	Repower.....	71
5.3.5	Repurpose	73
5.3.6	Recycle und Recover	75
5.4	Durchführung des Life Cycle Impact Assessments (LCIA) und Interpretation der Ergebnisse	80
5.4.1	Folgenabschätzung des LCIA.....	80
5.4.2	Sensitivitätsanalyse des LCIA.....	83
5.5	Entwicklung eines Vorschlags zur Simplifizierung.....	89
5.5.1	Identifikation von Gemeinsamkeiten im LCIA.....	90
5.5.2	Cut-off von Prozessen der Lebenszyklusanalysen	93
5.5.3	Evaluierung der simplifizierten Methode	94
6	Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	97
6.1	Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen	97
6.2	Weitere Ergebnisse	99
6.3	Einordnung und Diskussion der Ergebnisse.....	101
6.4	Einschränkungen und Ausblick.....	102
7	Anhang.....	106
7.1	Aufbereitung der Materialliste der Vestas V90	106
7.2	Life Cycle Inventory (LCI) der Lebensdauererweiterung	110
7.3	Life Cycle Inventory (LCI) von Reuse	114

7.4	Life Cycle Inventory (LCI) von Repower	119
7.5	Life Cycle Inventory (LCI) von Repurpose	123
7.6	Life Cycle Inventory (LCI) von Recycle und Recover	124
7.7	Materialspezifische Recycling- und Recovery- Prozesse	130
7.8	Ergebnisse des Lifecycle Impact Assessments (LCIA) und Daten der Sensitivitätsanalyse	139
7.9	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen	148
7.10	Simplifizierung der Lebenszyklusanalysen	151
8	Literaturverzeichnis	167
9	Abbildungsverzeichnis	177
10	Tabellenverzeichnis	178
11	Abkürzungsverzeichnis	181
12	Verwendete KI-Tools	184

1 Einleitung

Ein überwiegender Großteil der Wissenschaftler_innen führt die steigenden Temperaturen und die vermehrt auftretenden Extremwetterereignisse auf die menschengemachte Emission von Treibhausgasen (THG) zurück. Als Hauptverursacher_innen gelten dabei die Sektoren Energie und Industrie und Landwirtschaft. In Österreich sind die Treibhausgasemissionen seit 2005 rückläufig und 2022 mit 72,8 Mio. t CO₂-Äq. sogar um 7,9 % niedriger als im Basisjahr 1990 – dieser Trend ist auch in der restlichen Europäischen Union (EU) erkennbar. Global hingegen steigen die Treibhausgasemissionen laut den aktuellen Daten bis einschließlich 2022 weiterhin an (EK, 2023; Umweltbundesamt, 2024).

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Europäische Union hat sich für die Einhaltung des im Pariser Klimaabkommen von 2015 verankerten 2°C-Ziels und den wissenschaftlichen Erkenntnissen des Weltklimarates (IPCC) im Zuge des 2019 beschlossenen Green-Deals eine Klimaneutralität (Netto-Null-Treibhausgas-Emissionen) bis 2050 vorgenommen. Österreich möchte dieses Ziel bereits bis 2040 erreichen (EK, 2019; Gewessler, 2021).

Gegenwärtig ist unsere Wirtschaftsweise noch stark vom linearen Modell geprägt. Dieses folgt der Entnahme von Ressourcen, deren Verarbeitung, Nutzung und letztlich Entsorgung. Dabei werden global begrenzte Rohstoffe erschöpft, enorme Mengen an Müll produziert und THG-Emissionen emittiert. Demgegenüber steht die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy - CE), die stets versucht, Rohstoffe und Produkte bei höchstmöglicher Wertigkeit in geschlossenen Kreisläufen zu führen und Abfallmengen zu minimieren. Sie vereint eine Mischung vieler Ideen, wie saubere Produktion, Ressourceneffizienz und viele mehr. Der Primärressourceneinsatz kann dabei um bis zu 90 % verringert werden (Klenk et al., 2019). Eine rasche Transformation unserer traditionell linearen Wirtschaftsweise hin zu einer ressourcen- und umweltschonenden CE ist daher dringend erforderlich, um die im europäischen Green Deal festgelegte Klimaneutralität Europas bis 2050 zu erreichen. Neben dem Umweltschutz bietet die CE weitere Potenziale, z. B. zur Versorgungssicherheit in Europa zu oder zur Schaffung neuer Arbeitsplätze (Velenturf, 2021).

Erneuerbare Energien gelten als Schlüsseltechnologien der CE. Insbesondere in der Elektrizitätsgewinnung hat Windkraft enormes Potenzial, den THG-Ausstoß zu reduzieren und den aktuellen Klimaentwicklungen entgegenzuwirken (Pego, 2019). Seit 20 Jahren steigt die installierte Windkraftleistung in Österreich rapide an (IG Windkraft, 2025). Die durchschnittliche Lebensdauer von Windkraftanlagen bei entsprechender Wartung und Instandhaltung beträgt 20–25 Jahre. Dadurch erreicht nun eine Vielzahl der Anlagen das Ende ihres Betriebes, weshalb mit einem

verstärkten Rückbau zu rechnen ist (Scherhauser et al., 2021; Wien Energie, 2023). Die Ansätze im End-of-Life-Management (EoL-Management) von Windkraftanlagen sind vielfältig. In der Umsetzung basieren diese aber dennoch stark auf linearen Modellen, die wenig Rücksicht auf die Möglichkeiten der CE nehmen. Dies führt zu erheblichen Mengen an Abfall und ungenutzten Ressourcen, die das EoL-Management von Windkraftanlagen zu einem Schwachpunkt in der Umweltperformance der Anlagen macht. Es ist unklar, wie nach Erreichen des Endes ihrer Lebensdauer mit Windkraftanlagen umgegangen werden soll, sodass möglichst geringe Umweltschäden entstehen (Mendoza et al., 2022; Pego, 2019).

1.2 Forschungsfragen und Ziel der Arbeit

In dieser Diplomarbeit werden CE-Strategien in der EoL-Phase von Windkraftanlagen am Beispiel der Vestas V90 betrachtet. Diese hat eine hohe Relevanz in Österreich, mit 115 Anlagen im Betrieb entfallen insgesamt 5,9 % der installierten Leistung auf dieses Modell. Weiters wurden diese zwischen 2005 und 2014 an das Energienetz angeschlossen, was eine zeitnahe Demontage vermuten lässt (The Wind Power, 2025). Die Lebenszyklusanalyse (LCA) stellt hierbei die zentrale Methode zur Umweltbewertung der jeweiligen CE-Strategie dar. Diese Diplomarbeit befasst sich ausschließlich mit der Betrachtung von Umweltauswirkungen, nicht mit sozialen oder wirtschaftlichen Dimensionen der Nachhaltigkeit.

Aus der in Kapitel 1.1 vorgestellten Problemstellung leitet sich die zentrale Hauptforschungsfrage ab:

1. Welche Anforderungen muss eine LCA-basierte simplifizierte Bewertungsmethode erfüllen, um die Umweltauswirkungen von Kreislaufwirtschaftsstrategien für Windkraftanlagen am Ende ihrer Lebensdauer am Beispiel der Vestas V90 mit ausreichender Genauigkeit und Zeiteffizienz zu quantifizieren?

Aus der Hauptforschungsfrage ergeben sich die folgenden drei Subforschungsfragen:

2. Was ist der aktuelle Stand der Forschung der Ökobilanzierung von End-of-Life-Strategien in der Windindustrie?
3. Welche Gemeinsamkeiten in den Lebenszyklusanalysen verschiedener End-of-Life-Strategien der Kreislaufwirtschaft lassen sich für Hauptkomponenten der Vestas V90 Windkraftanlage identifizieren?
4. Wie kann der Ökobilanzierungsprozess der Vestas V90 für ausgewählte Komponenten und CE-Strategien simplifiziert werden?

Des Weiteren versucht diese Arbeit die in Kapitel 1.1 genannten Forschungslücken zu schließen und eine ökologische Bewertung von CE-Strategien durchzuführen. Es ergeben sich die folgenden Forschungsziele:

1. Darstellung des Forschungsstandes in Bezug auf CE-Strategien im EoL-Management von Windkraftanlagen
2. Ökologische Bewertung von CE-Strategien in der EoL-Phase von Windkraftanlagen
3. Simplifizierung des Ökobilanzierungsprozesses einer Vestas V90

In Kapitel 6.1 sind die zur Beantwortung der Forschungsfragen gefundenen Ergebnisse gesammelt und beschrieben.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Der Aufbau und die Struktur dieser Diplomarbeit orientieren sich an der Beantwortung der zuvor definierten Forschungsfragen (vgl. Kapitel 1.2). Zu Beginn werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen beschrieben, wobei die wichtigsten Konzepte der CE und für diese Arbeit relevante Information zu Windkraftanlagen vermittelt werden.

Kapitel 3 nutzt die systematische Literaturanalyse nach Tranfield et al. (2003) um existierende und ähnliche Lösungsansätze sowie weitere relevante Literatur für die Problemstellung zu identifizieren. Diese wird zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage genutzt. Ergänzend wird Backward und Forward Reference Searching eingesetzt, um die Suche zu vervollständigen.

Die Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040 & 14044 wird eingesetzt, um die Umweltauswirkungen verschiedener CE-Strategien zu berechnen. Zusammengefasst kommen also drei Methoden zur wissenschaftlichen Bearbeitung dieser Diplomarbeit zum Einsatz, die in Kapitel 4 ausführlich beschrieben sind und ein strukturiertes Vorgehen sicherstellen:

1. Die systematische Literaturrecherche (Tranfield et al., 2003),
2. Forward und Backward Reference Searching und
3. die Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040 (ISO, 2006a) & ISO 14044 (ISO, 2006b).

Mithilfe der beschriebenen Grundlagen, der identifizierten Literatur sowie den vorgestellten Methoden werden in Kapitel 5 die verbleibenden Forschungsfragen beantwortet. Anhand der Vestas V90 werden verschiedene EoL-Strategien durch Lebenszyklusanalysen modelliert und aus ökologischer Perspektive bewertet. Wichtig ist hier, die Umweltbewertung auf der Ebene der Systemkomponenten (darunter Fundament, Turm, Gondel und Rotor) durchzuführen. Diese Bewertung lässt in einem weiteren Schritt einen objektiven Vergleich der EoL-Strategien der Komponenten untereinander zu. Dabei werden Gemeinsamkeiten in den Lebenszyklusanalysen in der EoL-Bewertung der CE-Strategien erkennbar und zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage genutzt. Schließlich wird ein Vorschlag zur Reduktion des

Berechnungsaufwandes der Lebenszyklusanalysen dieser EoL-Strategien erarbeitet, evaluiert und Anforderungen an eine LCA-basierte simplifizierte Berechnungsmethode zur Bearbeitung der ersten und vierten Forschungsfrage entwickelt.

Kapitel 6 diskutiert die Ergebnisse dieser Diplomarbeit und gibt einen Ausblick sowie mögliche Schritte zur Weiterentwicklung der hier gefundenen Erkenntnisse.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für diese Diplomarbeit relevanten Grundlagen und Definitionen vorgestellt. Es behandelt Basiswissen zur Kreislaufwirtschaft mit ihren Grundsätzen, Prinzipien und Potenzialen und gibt eine Einführung zu Windkraftanlagen, deren EoL-Management sowie technische Details.

2.1 Grundlagen der Kreislaufwirtschaft

Die Auswirkungen der menschengemachten Klima-Krise mit steigenden Temperaturen und vermehrter Extremwetterereignisse sind schwer zu leugnen. Sie sind die Folge von THG-Emissionen, begünstigt durch unsere lineare ‘take-make-use-waste-Wirtschaft’, die der Natur Rohstoffe entnimmt, Produkte und Güter herstellt und Energie gewinnt, diese oftmals nur kurz nutzt, als Abfall entsorgt und letztlich Emissionen in die Luft, ins Wasser und in den Boden abgibt. Der rasche Anstieg der THG-Emissionen wurde zusätzlich durch den Massenkonsum in entwickelten Ländern sowie die schnelle Industrialisierung von Schwellenländern angeheizt, was global zu einem starken Verbrauchswachstum führte. Dass dieses Modell nicht nachhaltig ist und langfristig nicht fortgeführt werden kann, ist längst bekannt. Bisherige Umweltbemühungen haben sich primär auf den Energiesektor, insbesondere auf Energieeffizienz und erneuerbare Energiesysteme, beschränkt, wodurch 55 % der THG-Emissionen adressiert werden können. Die verbleibenden 45 % entfallen auf die Herstellung und Nutzung von Materialien, Produkten und Lebensmitteln sowie unserer Flächen. Die CE kann speziell bei der Emissionsreduktion im Produktionssektor von Nutzen sein und dient als zentraler Ansatz, um derzeitige lineare Gesellschafts- und Wirtschaftssysteme zu überwinden. Abfälle, wie sie durch unsere lineare Wirtschaft entstehen, gibt es in natürlich vorkommenden Kreisläufen nicht, genau dieses Prinzip macht sich die CE zum Vorbild (BMK, 2022; Ellen MacArthur Foundation, 2021a, 2021b).

2.1.1 Definition der Kreislaufwirtschaft

Die Definitionen der Kreislaufwirtschaft sind weitreichend und unterscheiden sich je nach Fachgebiet häufig in Interpretation und Implementierung. Ein Bericht von Kirchherr et al. (2023) hat 221 Definitionen aus akademischen englischsprachigen Artikeln untersucht und kommt zu dem Schluss, dass sich die Bedeutung des Begriffs Kreislaufwirtschaft bereits in den fünf Jahren zwischen 2017 und 2022 gewandelt hat. Dies ist kein Einzelfall in der Linguistik, wo sich Begriffsdefinitionen dynamisch verhalten und am Gebrauch der Sprachgemeinschaft orientieren, wenn auch meist langsam (Hamilton et al., 2018). Die 221 betrachteten Definitionen der Kreislaufwirtschaft unterscheiden sich dabei hauptsächlich in ihrer Semantik, weniger in ihrer Bedeutung. Durch Anwendung eines ‘Coding Frameworks’ ergibt sich die

folgende gemeinsame verbale Darstellung der Definitionen (mit DeepL aus dem Englischen ins Deutsche übersetzt):

„Die Kreislaufwirtschaft ist ein regeneratives Wirtschaftssystem, das einen Paradigmenwechsel erfordert, um das Konzept des „End-of-Life“ durch die Reduzierung, die alternative Wiederverwendung, das Recycling und die Rückgewinnung von Materialien in der gesamten Lieferkette zu ersetzen, mit dem Ziel, die Werterhaltung und die nachhaltige Entwicklung zu fördern, die Umweltqualität, die wirtschaftliche Entwicklung und die soziale Gerechtigkeit zum Nutzen heutiger und künftiger Generationen zu schaffen. Ermöglicht wird dies durch eine Allianz von Interessengruppen (Industrie, Verbraucher, politische Entscheidungsträger, Hochschulen) und deren technologische Innovationen und Fähigkeiten (Kirchherr et al., 2023, S. 4).“

Mehr als 30 der 221 durch Kirchherr et al. (2023) analysierten Definitionen der Kreislaufwirtschaft verwiesen zumindest abschnittsweise auf die Ellen MacArthur Foundation, die Kreislaufwirtschaft 2015 wie folgt definiert (mit DeepL aus dem Englischen ins Deutsche übersetzt):

„Eine Kreislaufwirtschaft ist eine Wirtschaft, die von vornherein restaurativ und regenerativ angelegt ist und darauf abzielt, dass Produkte, Komponenten und Materialien zu jeder Zeit ihren höchsten Nutzen und Wert behalten, wobei zwischen technischen und biologischen Kreisläufen unterschieden wird. Dieses neue Wirtschaftsmodell zielt darauf ab, die globale wirtschaftliche Entwicklung vom Verbrauch endlicher Ressourcen zu entkoppeln. Eine Kreislaufwirtschaft ist eine Antwort auf die zunehmenden ressourcenbezogenen Herausforderungen für Unternehmen und Volkswirtschaften und könnte Wachstum generieren, Arbeitsplätze schaffen und die Umweltauswirkungen einschließlich der Kohlenstoffemissionen verringern. Während der Ruf nach einem neuen Wirtschaftsmodell, das auf Systemdenken basiert, immer lauter wird, kann eine beispiellos günstige Abstimmung von technologischen und sozialen Faktoren heute den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ermöglichen (Ellen MacArthur Foundation, 2015, S. 2).“

Zusammenfassend lässt sich im Sinne der vielen Definitionen der Kreislaufwirtschaft festhalten, dass ihr Ziel darin besteht, den Primärressourceneinsatz zu verringern, Produkte und Materialien so lange wie möglich im Gebrauch zu halten, Abfälle zu

minimieren und dadurch heutigen und zukünftigen Generationen ein nachhaltiges Leben ermöglichen.

2.1.2 Grundsätze und Prinzipien der Kreislaufwirtschaft

Im Rahmen der österreichischen CE-Strategie hat sich die Bundesregierung bis 2050 als Ziel gesetzt, die Wirtschaft und Gesellschaft des Landes in eine umfassend nachhaltige CE zu transformieren. Nur mithilfe dieser Transformation kann es gelingen, die für 2040 angestrebte Klimaneutralität zu erreichen und dass Österreich zu den Vorreiterstaaten in diesem Bereich aufschließt. Die österreichische Kreislaufstrategie orientiert sich dabei an den in Abbildung 2.1 dargestellten Kreislaufwirtschaftsgrundsätzen (BMK, 2022).

In diesem von Potting et al. (2017) vorgestellten und vom Bundesministerium für Klimaschutz (BMK) übernommenen Framework werden insgesamt zehn Grundsätze der CE (oftmals auch als CE-Strategien bezeichnet) definiert, die sich in drei Hauptkategorien gliedern. Diese sind:

1. Intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur;
2. Verlängerte Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur;
3. Wiederverwerten von Materialien.

Grundsätzlich gilt: Je weiter oben ein Grundsatz in Abbildung 2.1 steht, desto höher ist seine Zirkularität und umso geringer sind Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen. Daher sollte die intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur bevorzugt eingesetzt werden (Potting et al., 2017). In der 2015 von der Ellen MacArthur Foundation beschriebenen Definition der Kreislaufwirtschaft (vgl. Kapitel 2.1.1) wird betont, dass Erzeugnisse, Komponenten und Materialien zu jeder Zeit ihren höchsten Wert behalten sollen. Beispielsweise bleibt der Nutzen eines bestehenden Produktes bei der Anwendung oben gereihter Grundsätze der CE, wie die Steigerung der Nutzungsintensität durch Teilen oder Wiederverwendung viel größer als durch niedrig gereihter Grundsätze wie dem Recycling oder der thermischen Verwertung.

Im Verlauf dieser Diplomarbeit sind nur CE-Strategien in der End-of-Life-Phase von Bedeutung, also der Umgang mit Produkten und Anlagen, die ihr Lebensende erreicht haben. Zu diesem Zeitpunkt im Lebenszyklus entfallen die Möglichkeiten der ersten drei R-Grundsätze¹ fast ausnahmslos und es verbleiben die insgesamt sieben R-Grundsätze der Hauptkategorien „Verlängerte Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur“ und „Wiederverwerten von Materialien“.

¹ Unter R-Grundsätze versteht man die Sammlung der Kreislaufwirtschaftsstrategien (Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, ...), diese beginnen mit dem Buchstaben R.



Abbildung 2.1: Grundsätze der Kreislaufwirtschaft in Österreich (R-Grundsätze)
(BMK, 2022, S. 15)

Durch Vermeidung von Abfällen und Umweltverschmutzung schafft es die CE, enorme ökologische Potenziale zu entfalten, diese umfassen eine Reduktion der Umweltbelastungen und THG-Emissionen, die Verbesserung der Luft- und Wasserqualität sowie dem Schutz der Biodiversität (BMK, 2022; Ellen MacArthur Foundation, 2021a). 90 % des Biodiversitätsverlustes lässt sich dabei allein auf die Extraktion und Verarbeitung unserer natürlichen Ressourcen zurückführen (Ellen MacArthur Foundation, 2021b). Eine effiziente Nutzung von Materialien und die Förderung regenerativer Produktionsmethoden können dabei erheblich zu Klimawandelresilienz beitragen und den Ressourcenverbrauch senken (Ellen MacArthur Foundation, 2021a). Zusammengefasst erlaubt die CE eine Senkung des ökologischen Fußabdrucks sowie eine Verbesserung natürlicher Systeme.

Die ökonomischen Potenziale der CE beinhalten signifikante Kosteneinsparungen durch Ressourceneffizienz sowie die Schaffung neuer Wertschöpfungsmodelle, die die Nutzung von Produkten maximieren und wirtschaftliche Aktivitäten flexibler gestalten (Ellen MacArthur Foundation, 2021b). So können beispielsweise dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle wie Mieten, Teilen und Pay-per-Use die Nutzungsintensität von Produkten erhöhen (Ellen MacArthur Foundation, 2021a). Das Wirtschaftswachstum wird durch die Förderung von Innovationen stark angekurbelt, wobei die OECD in zwei ihrer Studien auf eine positive Beschäftigungswirkung durch Ressourceneffizienz und den Übergang zu einer CE hinweist (OECD, 2020b, 2020a). Die CE trägt weiters zur Senkung der Importabhängigkeit bei, indem sie die lokale Wertschöpfung fördert und Ressourcen im Umlauf behält (BML, 2021).

Zuletzt kann eine CE auch soziale Potenziale entfalten, indem sie durch die Reduktion der Umweltauswirkungen menschlicher Aktivitäten zu einer gesteigerten Lebensqualität und sozialen Gerechtigkeit beiträgt (BMK, 2022). Ein Übergang hin zu einer CE fördert sinnvolle Arbeitsplätze, die in der Regel ein hohes Identifikationspotenzial für die Mitarbeiter_innen bieten. (BMK, 2022)

2.2 Grundlagen der Windkraftanlagen

Dieses Kapitel beschreibt Windkraft zunächst auf systemischer Ebene in Zahlen und Daten, bevor der Aufbau, technische Details und das EoL-Management von Windkraftanlagen dargestellt werden. In diesem Kapitel und in weiterer Folge wird, sofern nicht explizit angeführt, immer von On-Shore-Windkraftanlagen ausgegangen.

Die Windkraft gilt als Hoffnungsträger in der Energiewende hin zur gänzlich erneuerbaren Energiegewinnung und ist somit ein wichtiger Bestandteil der angestrebten CE (Pego, 2019). Windkraftanlagen wandeln die Strömungsenergie der bewegten Luftmasse zunächst in rotatorische und im Anschluss mit Generatoren in elektrische Energie (Gasch et al., 2005).

2.2.1 Windkraft in Zahlen

In den späten Jahren des 20. Jahrhunderts begann Österreich mit der Installation der ersten Windkraftanlagen zur Stromproduktion, seitdem stieg die installierte Windkraftleistung wie in Abbildung 2.2 ersichtlich rapide an. Aufgrund der durchschnittlichen Lebensdauer von Windkraftanlagen von 20–25 Jahren und dem Repowering alter Anlagen ist zu erwarten, dass sich die Rückbau-Rate von Windkraftanlagen in naher Zukunft erhöhen wird (Scherhauser et al., 2021; Wien Energie, 2023).

Die Stromerzeugung in Österreich in 2024 belief sich auf insgesamt 74,8 TWh und setzte sich zu 59,6 % aus Wasserkraft-, zu 19,2 % aus Wärmekraft-, zu 10,9 % aus Windkraftwerken und zu 10,2 % aus Photovoltaikanlagen zusammen (E-Control, 2025). Die in Österreich installierte Leistung der 1 451 Windkraftanlagen betrug am Ende des Jahres 2023 4 028 MW, das entspricht einer durchschnittlichen Anlagenleistung von 2,77 MW (IG Windkraft, 2025).

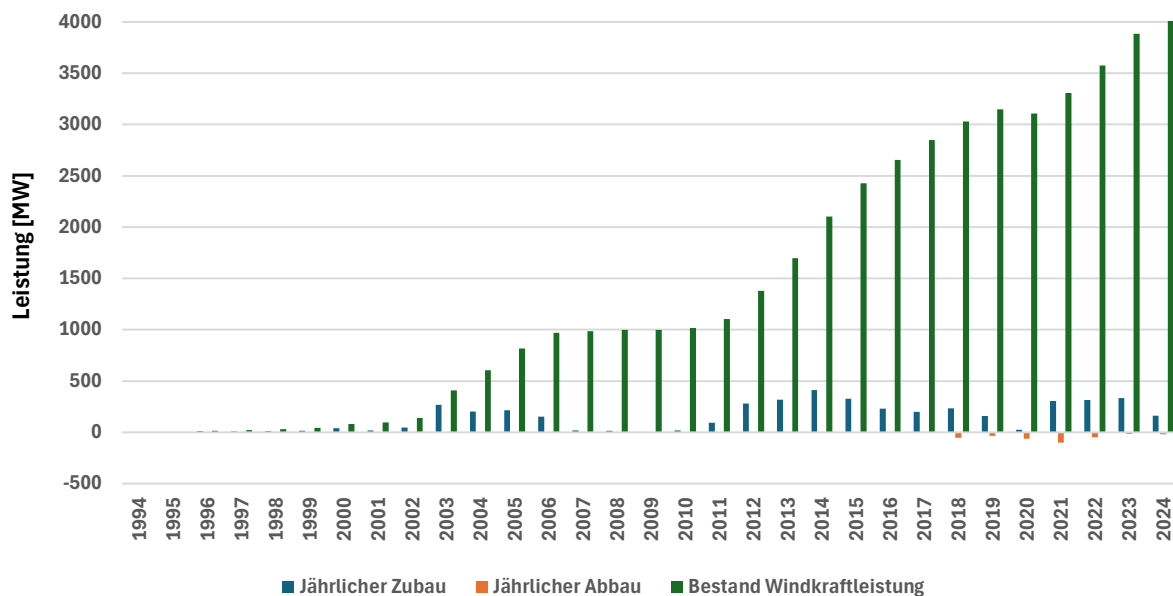


Abbildung 2.2: Windkraftleistung in Österreich bis 2023 mit Prognose für 2024 (IG Windkraft, 2025)

Die Energiewerkstatt untersuchte 2023 Österreichs Windpotenzial bei unterschiedlichem Ausmaß der Flächennutzung. Unter Berücksichtigung beschränkender Kriterien wie Mindestabständen zu Siedlungsgebieten, Straßen, Leitungen und Schutzgebieten wurde eine für eine Windenergienutzung geeignete Fläche in Österreich auf 2636 Quadratkilometer, also 3,14 % der Bundesfläche, ermittelt. Theoretisch könnte Windkraft auf diesen Flächen das 1,5-fache des österreichischen Elektrizitätsbedarfes decken. Ende 2022 wurden nur 178 km², also 0,2 % der Fläche Österreichs, für Windkraft beansprucht. Deutlich realistischer hingegen sind die in diesem Bericht dargestellten Szenarien für 1–2 % der Fläche Österreichs, hierbei soll eine installierte Leistung von

14–29 GW jährlich 36–83 TWh Elektrizität zur Verfügung stellen (Energiewerkstatt, 2023).

Im integrierten österreichischen Netzinfrasturkturplan nennt das BMK (2024) sogenannte Transition-Szenarien für 2030 und 2040, die den schrittweisen Übergang zur Klimaneutralität auf infrastruktureller Ebene beschreiben. Die durch Windkraft erzeugte elektrische Energie soll demnach von 8 TWh im Jahr 2023 auf 21 TWh im Jahr 2030 und auf 29 TWh im Jahr 2040 angehoben werden. Noch stärker soll nur der Ausbau von PV-Anlagen von 3 TWh im Jahr 2021 auf 41 TWh im Jahr 2040 steigen. Durch eine zusätzliche Erweiterung der Wasserkraft von 39 TWh im Jahr 2021 auf 48 TWh im Jahr 2040 soll die fossile Elektrizitätsgewinnung entsprechend den Zielsetzungen im europäischen Green Deal vollständig substituiert werden. (BMK, 2024b). Die Daten des integrierten österreichischen Netzplans sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Demnach soll Österreich zukünftig auch Netto-Exporteur in der Elektrizitätsgewinnung werden.

Tabelle 2.1: Stromerzeugung nach Energieträgern für ausgewählte Jahre nach Energiebilanz und Netzinfrasturkturplan-Szenarien (BMK, 2024b; Montanuniversität Leoben (EVT), 2023)

Kategorie	Energiebilanz		Szenarien Netzinfrasturkturplan			
Jahr	2021		2030		2040	
Einheit	[TWh]	[%]	[TWh]	[%]	[TWh]	[%]
fossile Energieträger	14	20,9	10	9,5	0	0,0
Wasserkraft	39	58,2	47	44,8	48	36,1
Biomasse	4	6,0	6	5,7	6	4,5
Geothermie	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Photovoltaik	3	4,5	21	20,0	41	30,8
Wind	7	10,4	21	20,0	29	21,8
Wasserstoff/Biomethan	0	0,0	0	0,0	9	6,8
Stromerzeugung gesamt	67	100,0	105	100,0	133	100,0
Nettoimporte	8	10,7	-15	-16,7	-12	-9,9

Bereits in der Vergangenheit stieg die Größe und somit Leistung von neuen Windkraftanlagen weltweit tätiger Hersteller wie Vestas, Envision, Sany, Goldwind oder Nordex stetig an. In den Jahren um 2000 war die Herstellung von Anlagen mit einem Rotordurchmesser von 90 m und einer Anlagenleistung von 2 MW üblich, im Jahr 2023 wurden WKA mit 220 m Rotordurchmesser und 10 MW Anlagenleistung installiert. Dieser Trend wird sich auch weiterhin fortsetzen (GWEC, 2024).

2.2.2 Aufbau von Windkraftanlagen

Im Allgemeinen bestehen moderne Onshore-Windkraftanlagen aus den Systemkomponenten Fundament, Turm, Gondel, Rotor, Transformator und dem elektronischen System sowie der Verkabelung. Abbildung 2.3 verdeutlicht diese und untergliedert sie in Hauptkomponenten mit den üblicherweise eingesetzten Materialien. Dabei wird zwischen Windkraftanlagen mit oder ohne Getriebe sowie

Bauweisen mit Stahlrohr- oder Hybrid-Türmen (bestehend aus Beton und Stahl) unterschieden (Scherhauser et al., 2021).

Abbildung 2.4 quantifiziert anhand von Daten von Scherhauser et al. (2021) die Zusammensetzung der Gesamtmasse einer Windkraftanlage einerseits durch Hauptkomponenten und andererseits anhand der üblichen Materialien. Für den Großteil der Masse sind dabei die Hauptkomponenten Fundament und Turbine (98,8 % der Gesamtmasse) und die Materialien Beton und Eisen-Metalle (96,1 % der Gesamtmasse) verantwortlich. Die Unterschiede der Massen je Leistungseinheit in Abbildung 2.4a und Abbildung 2.4b wurden von Scherhauser et al. (2021) nicht begründet. Die Mehrheit der WKA in Österreich ist mit einem Getriebe ausgestattet (Scherhauser et al., 2021).

Bis Ende des Jahres 2023 fielen 52 % und 32 % der in Österreich in Betrieb genommen Windkraftanlagen auf Enercon und Vestas. Die verbleibenden 16 % entfielen auf Hersteller wie Nordex, Leitwind, GE Energy, Windtec, Siemens und weitere (Eisl & Schlund, 2024). Die Vestas V90 ist mit 115 laufenden Anlagen und 5,9 % der installierten Windkraftleistung eine der am häufigsten eingesetzten Windkraftanlagen in Österreich. Diese wurden zwischen 2005 und 2014 an das Energienetz angeschlossen, was bei einer Betriebsdauer von üblicherweise 20 Jahren eine zeitnahe Demontage vermuten lässt (Garrett & Rønde, 2011; The Wind Power, 2025). Daher stellt die Vestas V90 eine ausgezeichnete Windkraftanlage für die Bearbeitung der in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfragen dar. Nachstehend werden einige Details dieser Windkraftanlage beschrieben.

2.2.3 Vestas V90-2.0 MW Windkraftanlage

Die Vestas V90-2.0 MW ist eine Windkraftanlage mit Stahlurm, einem dreiblättrigen Rotor mit einem Durchmesser von 90 m und einer horizontalen Rotorachse, die sich je nach Ausführung in 80–125 m über dem Boden befindet. Die WKA umfasst rund 25 000 Bauteile aus einer Vielzahl an Materialien. Sie beginnt ab Windgeschwindigkeiten von 4 m/s Elektrizität zu produzieren, erreicht ab 13 m/s ihre Maximalleistung von 2 MW und schaltet bei über 25 m/s zum Schutz der Anlage ab, sie ist nach der Internationalen Norm für Windenergieanlagen IEC 61400-1:2019 (IEC, 2019) für die Windklasse IIIA (langjährige mittlere Windgeschwindigkeiten von 7,5 m/s und hohe Turbulenzintensität) klassifiziert. Die Regelung der Leistung erfolgt durch Verstellen des Neigungswinkels der Rotorblätter zum Wind. Das hat eine Veränderung der Drehzahl des Rotors zur Folge. Dessen Nenndrehzahl liegt bei 14,5 U/min, das Getriebe erhöht diese mit zwei Planetenstufen sowie einer schrägverzahnten Stirnradstufe auf die Generatordrehzahl von ca. 1500 U/min. In der 50-Hz-Variante wird ein poliger, doppelt gespeister Generator mit Schleifringen verbaut (Vestas Wind Systems A/S, 2011).

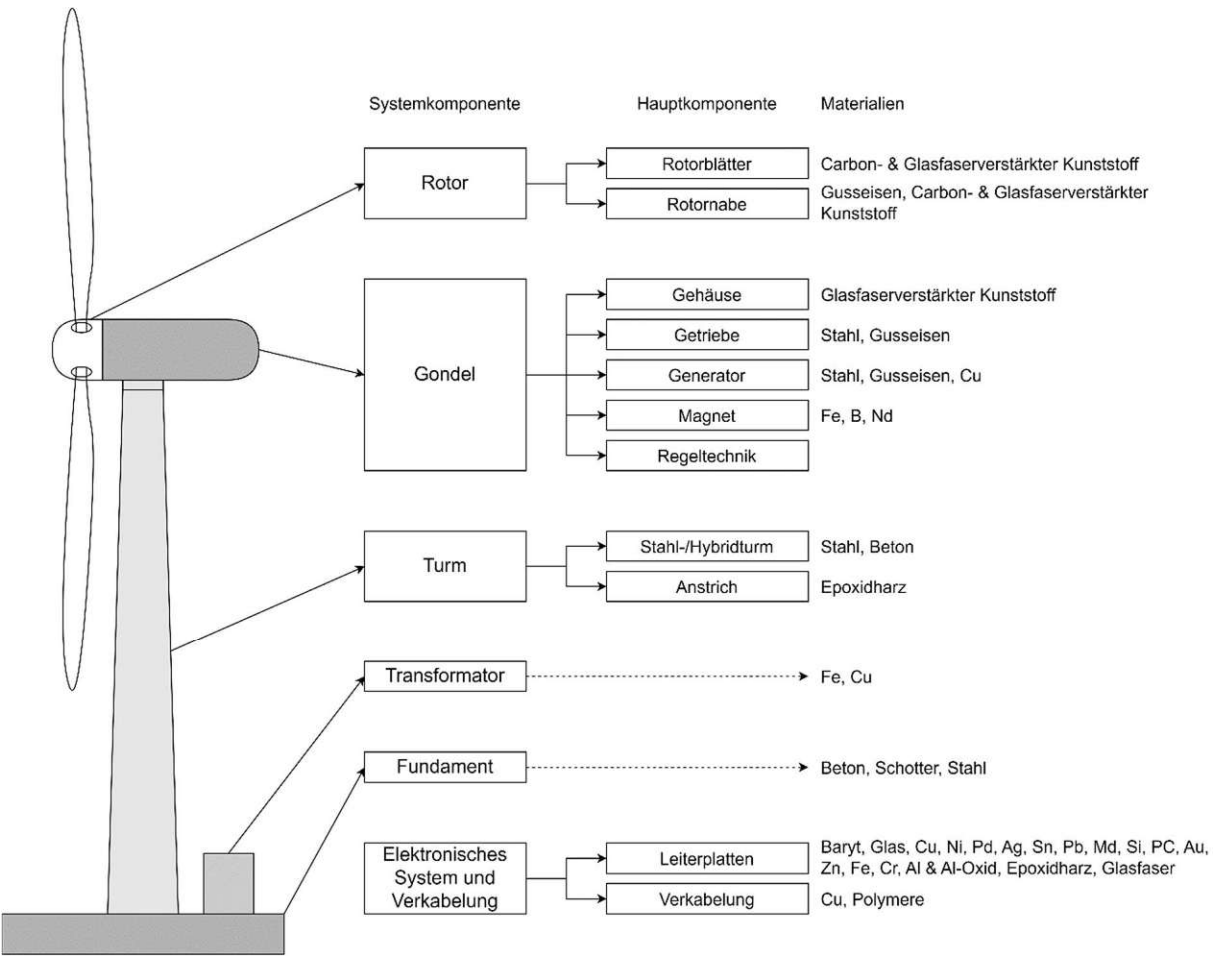


Abbildung 2.3: Aufbau und Zusammensetzung moderner Windkraftanlagen (Scherhauber et al., 2021)

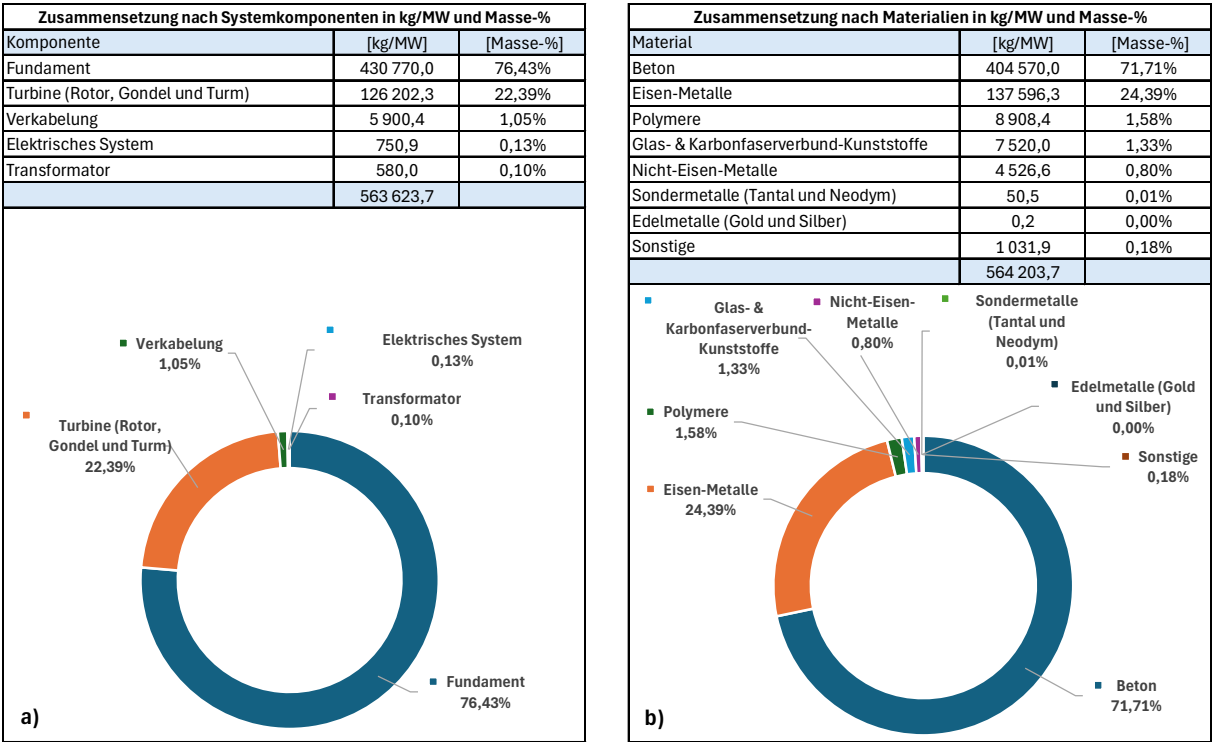


Abbildung 2.4: Übliche Zusammensetzung von Windkraftanlagen nach Systemkomponenten und Materialien (Scherhauber et al., 2021)

Im Produktportfolio von Vestas wurden drei verschiedene Modelle mit derselben 2 MW Gondel ausgestattet. Diese sind die V80-2.0 MW, die V90-2.0 MW und die V100-1.8 MW, die für unterschiedliche Windverhältnisse optimiert sind. Ein beträchtlicher Anteil der verbauten Komponenten (ca. 90 % des Gesamtgewichts) ist für alle drei Windkraftanlagen ident, die Unterschiede liegen hauptsächlich bei den verschiedenen Rotorblattlängen, der Leistungsabgabe am Generator und der Rotornabe. Für die Lebenszyklusanalyse der Vestas V90 wurde vom Hersteller selbst eine Lebensdauer von 20 Jahren als Grundlage für die Berechnungen verwendet (Garrett & Rønde, 2011).

Abbildung 2.5 verdeutlicht die Massen-Zusammensetzung der Vestas V90 nach Systemkomponenten und Materialien. Die Sonder- und Edelmetalle der Anlage wurden von Vestas (2011) leider nicht spezifisch ausgewiesen und sind in Abbildung 2.5b der Kategorie ‚Sonstige‘ zugeordnet. Ferner unterscheidet sich das Gewicht pro Leistungseinheit in Abbildung 2.5a und Abbildung 2.5b um 80 kg/MW (0,14 ‰), der Grund dafür wird in Rundungsfehlern der vom Hersteller bereitgestellten Daten vermutet. Diese umfassen einen Windpark mit 25 Windkraftanlagen (50 MW installierte Gesamtleistung) mit ihren Fundamenten, der Verkabelung sowie einer gemeinsamen Transformator-Station (Garrett & Rønde, 2011). Die detaillierte Zusammensetzung der Vestas V90 wird im Zuge der späteren Lebenszyklusanalysen in Kapitel 5 besprochen.

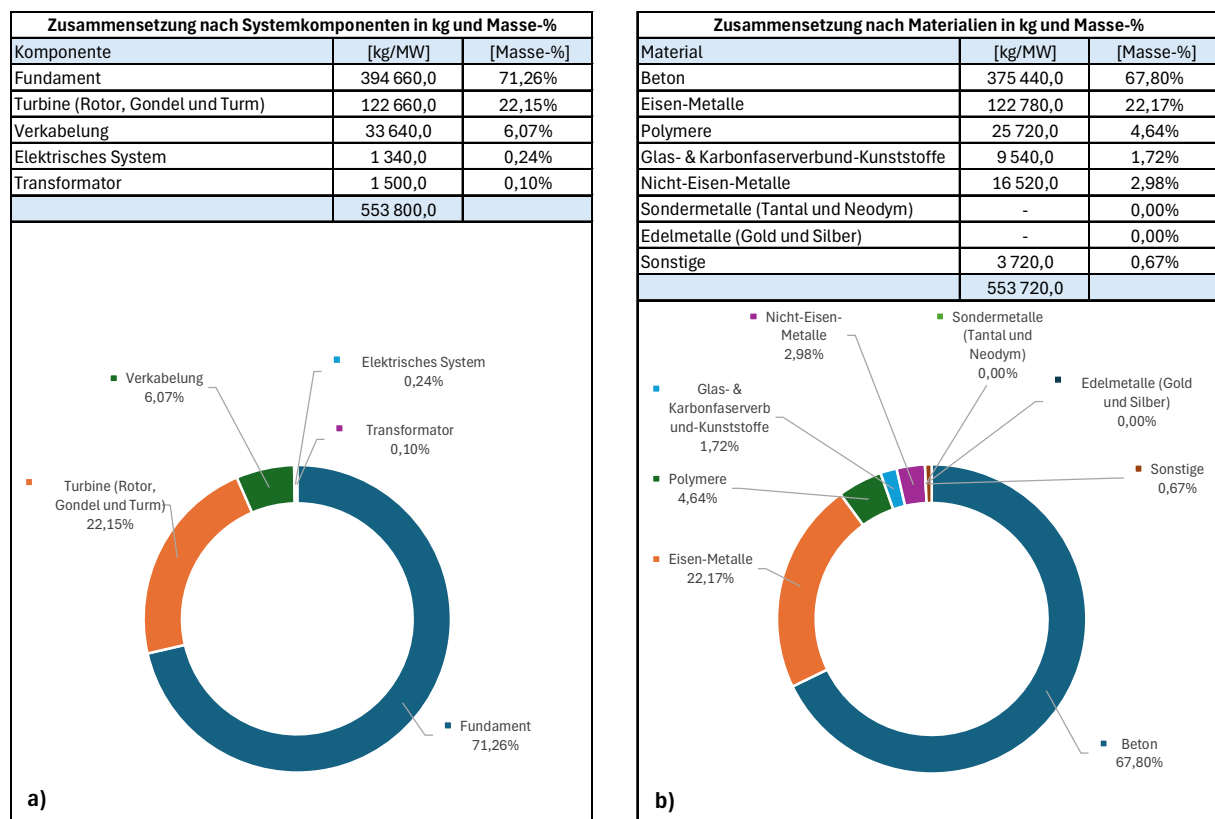


Abbildung 2.5: Zusammensetzung der Vestas V90-2MW Windkraftanlage nach Systemkomponenten und Materialien (Garrett & Rønde, 2011)

2.2.4 End-of-Life-Strategien von Windkraftanlagen

Das EoL-Management von Windkraftanlagen wird als Schwachpunkt in deren Umweltperformance betrachtet und obwohl die Strategien der CE vielfältig sind, landen wesentliche Anteile außer Betrieb genommener Anlagen, wie die Rotorblätter, global gesehen noch heute auf Deponien. Eine funktionierende CE zielt darauf ab, diese ungenutzten Ressourcen und Potenziale aufzudecken und von ihnen zu profitieren (Mendoza et al., 2022; Pego, 2019).

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 besprochen, entfallen im Allgemeinen die ersten drei CE-Strategien, wie sie vom BMK (2022) in Anlehnung an Potting et al. (2017) definiert wurden, für EoL-Betrachtungen. Für die weitere Betrachtung kommen also nur noch die folgenden CE-Strategien unter ihren Hauptkategorien in Frage:

- Verlängerte Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur: Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose
- Wiederverwerten von Materialien: Recycling, Thermische Verwertung (Recover)

Das EoL-Management von Windkraftanlagen ist größtenteils von früheren Phasen im Produktlebenszyklus abhängig, beispielsweise durch die Wahl der Materialien sowie der Qualität der Instandhaltung während des Betriebs (Kasner, 2022). In der spezifischen Literatur, die sich mit dem EoL-Management von Windkraftanlagen auseinandersetzt, wird meist von Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower, Repurpose, Recycle und Recover gesprochen (vgl. Kapitel 3.4). Diese werden nachstehend im Kontext von Windkraftanlagen besprochen und mit dem Framework des BMK (2022) in Anlehnung an Potting et al. (2017) zusammengeführt. Erreicht eine Windkraftanlage das Ende ihrer Betriebsdauer, so stehen laut Kasner (2022) sowie Tota-Maharaj & McMahon (2021) die folgenden EoL-Management-Strategien zur Auswahl:

1. Lebensdauererweiterung (Renovieren, Regenerieren und Reparieren)

Hierbei werden bestimmte Komponenten noch während oder am Ende der Betriebsdauer einer WKA repariert und erneuert, um die Lebensdauer zu verlängern und damit Umweltbelastungen und Abfälle zu verringern. (Kasner, 2022; Tota-Maharaj & McMahon, 2021).

2. Erneuerung (Partial and Full Repowering)

Partial Repowering bedeutet, dass Teile der Windenergieanlage modernisiert werden. So können beispielsweise effizientere Rotorblätter oder Generatoren in bestehende verbaut oder der Großteil der Anlage (mit Ausnahme von Turm und Fundament) erneuert werden. Beim Full Repowering hingegen wird die gesamte Turbine abgetragen und meist durch eine größere oder effizientere am Standort ersetzt (Kasner, 2022; Tota-Maharaj & McMahon, 2021).

3. Stilllegung

Die Windkraftanlage wird meist mit Ausnahme des Fundaments demontiert. Dieses kann je nach rechtlicher Situation entweder im Boden verbleiben oder aufwendig abgetragen werden. Demontierte Bauteile können aufbereitet (Remanufacture) und wiederverwendet (Reuse), anderweitig verwendet (Repurpose), recycelt, thermisch verwertet (Recover) oder sogar deponiert werden (Delaney et al., 2023; Kasner, 2022; Tota-Maharaj & McMahon, 2021; Zhang et al., 2023).

In Tabelle 2.2 werden die Systemkomponenten von WKA den EoL-Management-Strategien gegenübergestellt und mit der Terminologie des BMK (2022) in Einklang gebracht, sie zeigt Möglichkeiten sowie deren Stand der Technik in der EoL-Phase von Windkraftanlagen auf, indem sie beschreibt, ob die EoL-Strategien auf die jeweilige Systemkomponente von Windkraftanlagen im Allgemeinen machbar sind. Die einzelnen EoL-Strategien werden folglich mit absteigender Wertigkeit von links nach rechts im Sinne der CE im Detail besprochen. Nachstehend werden die darin enthaltenen EoL-Strategien beschrieben.

Bei der **Lebensdauererweiterung** von Windkraftanlagen werden diese über deren ursprünglich vorhergesehene Betriebsdauer hinaus betrieben. Verlängerungen von 10 Jahren und mehr sind dabei keine Seltenheit und Hersteller bieten teilweise sogar Zertifizierungen für dieses Vorgehen an. Üblicherweise sind im Zuge dessen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten nötig (Delaney et al., 2023).

Bei **Reuse** werden Windkraftanlagen nach deren Außerbetriebnahme und Demontage mit Ausnahme des Fundaments ganz oder komponentenweise wiederverwendet und falls nötig aufbereitet (Tota-Maharaj & McMahon, 2021). So kann beispielsweise das Getriebe überholt und in einen neuwertigen Zustand versetzt werden (Mendoza et al., 2022; Mendoza & Pigosso, 2023). Wiederverwendete Anlagen haben mit rund 10 Jahren meist eine verkürzte Lebensdauer im Vergleich zu neuen Windkraftanlagen mit Betriebsdauern von etwa 20 Jahren (Tota-Maharaj & McMahon, 2021). Es sind eigene Gebrauchtmärkte entstanden, die WKA üblicherweise in weniger entwickelte Volkswirtschaften wie Lateinamerika, Afrika, Indien und Osteuropa vertreiben (Delaney et al., 2023; Spini & Bettini, 2024). Dieses Vorgehen ist für größere Turbinen (z. B. 3 MW) aber aufgrund des aufwendigen Transportes eher unattraktiv (Scherhauser et al., 2021). Gewisse Komponenten wie doppelt gespeiste Induktionsgeneratoren können in anderen Anwendungen für denselben Zweck wiederverwendet werden (Omodara et al., 2023). Die Wiederverwendung von Generatoren aus getriebelosen Turbinen ist schwieriger, da diese für sehr spezielle Anwendungsfälle ausgelegt wurden. Deren Permanentmagneten können in speziellen Verfahren bei 350 °C entmagnetisiert und nach der Konstruktion eines neuen Pols ebenfalls in abweichenden Anwendungsgebieten wiederverwendet werden (Hogberg et al., 2017).

Tabelle 2.2: Überblick der EoL-Optionen und deren Stand der Technik für Systemkomponenten von WKA

EoL-Strategien in der Windkraft	Verlängerte Lebensdauer der WKA			Stilllegung der Systemkomponenten der WKA			
	Lebensdauer-erweiterung	Reuse	Repower	Repurpose	Recycle	Recover	Deponie
Kategorien der CE-Strategien lt. BMK (2022)	Verlängerte Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur				Wiederverwerten von Materialien		Lineare Strategie
Fundament	JA Wenn Anlage über Lebensdauer hinaus betrieben wird [1]	NEIN Abbau und Wiederaufbau nicht möglich [7]	JA Beim Partial Repowering wird das Fundament weiterverwendet [8]	NEIN Nicht bekannt	JA Beton abgerissener Fundamente kann zerkleinert und Frischbeton beigemischt werden, Stahl kann unendlich oft recycelt werden [7]	NEIN Nicht bekannt	JA Nach Stilllegung kann Fundament ganz oder teilweise im Boden verbleiben oder abgetragen und auf einer Deponie entsorgt werden [7]
Turm	JA Wenn Anlage über Lebensdauer hinaus betrieben wird [1]	JA Turm kann aufbereitet oder direkt wiederverwendet werden [7]	JA Beim Partial Repowering wird Turm weiterverwendet [8]	NEIN nicht bekannt	JA Stahl und Beton der Türme können fast gänzlich recycelt werden [7,9]	NEIN nicht bekannt	NEIN nicht bekannt
Gondel	JA Reparaturen an Gondel zur Verlängerung der Lebensdauer sind üblich [1]	JA Gondel kann wiederverwendet werden, beschädigte Komponenten werden erneuert [5]	JA Gondel kann zumindest Teilweise beim Partial Repowering wieder- und weiterverwendet werden [7]	NEIN nicht bekannt	JA Eisen-Metalle und Kupfer sind fast gänzlich Recyclebar, GFK & CFK können wie Rotorblätter recycelt werden [7,9]	JA Mitverbrennung von GFK-Teilen z.B. in Zementöfen ist eine gängige Praxis [3,4,9]	NEIN nicht bekannt
Rotor	JA Reparaturen am Rotor zur Verlängerung der Lebensdauer sind üblich [1]	JA Unbeschädigter Rotor kann wiederverwendet werden [1,7] und sogar bis zu 50 Jahre in Gebrauch bleiben [4]	JA Rotor wird meist zumindest teilweise ausgetauscht [7]	JA Rotorblätter können als Konstruktionselemente eingesetzt werden [3,1,9]	JA GFK und CFK in Rotorblätter können mechanisch, thermisch und chemisch recycelt werden [1,9], Metalle können recycelt werden [7]	JA Mitverbrennung von CFK- und GFK-Rotorblättern ist möglich [3,4,9]	JA Deponierung von Rotorblättern in USA & GB üblich [3,7], einige Länder (z.B. DE) haben diese Praxis verboten [3,4,9]
Transformator	JA Defekte Komponenten werden repariert [1]	JA Funktionierender Transformator kann wiederverwendet werden [7]	JA Transformator kann verbleiben sofern die elektrischen Anforderungen ähnlich bleiben [7]	NEIN nicht bekannt	JA Eisen und Kupfer können problemlos recycelt werden [7]	NEIN nicht bekannt	NEIN nicht bekannt
Elektrisches System & Verkabelung	JA Defekte Komponenten werden repariert [1]	JA Funktionierendes elektrisches System & Verkabelung können wiederverwendet werden [7]	JA elektrisches System & Verkabelung können verbleiben, sofern die Anforderungen ähnlich bleiben [7]	NEIN nicht bekannt	JA Metalle können recycelt werden, KST ist teilweise mit Qualitätsverlusten recyclebar [7]	JA Verbrennung von KST zur Energiegewinnung ist üblich [6]	NEIN nicht bekannt
Stand der Technik (TRL - Technology Readiness Level):		① - ④ Laborversuche oder nicht möglich/bekannt		⑤ - ⑦ Pilotversuche		⑧ - ⑨ Kommerzielle Nutzung	
Quellen: [1] (Delaney et al., 2023) [4] (Mishnaevsky, 2021) [7] (Tota-Maharaj & McMahon, 2021) [2] (Hogberg et al., 2017) [5] (Mendoza & Pigosso, 2023) [8] (Velenturf, 2021) [3] (Joustra et al., 2021) [6] (Oberoi et al., 2021) [9] (Zhang et al., 2023)							

Oftmals befinden sich veraltete Windenergieanlagen an Orten mit ausgezeichneten Windbedingungen, **Repowering** versucht diese Anlagen zu modernisieren, üblicherweise um die Energieeffizienz zu erhöhen, wobei der Umfang vom Tausch der Rotorblätter bis zur Erneuerung der gesamten Windkraftanlage reichen kann (Delaney et al., 2023). Unter dem **Partial Repowering** von Windkraftanlagen versteht man die Verlängerung der Lebensdauer einiger Komponenten (zumindest Turm und Fundament) und den Austausch anderer (z. B. Generator oder Rotorblätter) (Velenturf, 2021). Repowering unterscheidet sich von der Lebensdauererweiterung dadurch, dass nicht einfach nur defekte Komponenten und Teile getauscht werden, sondern diese durch modernere Technologien ersetzt werden (Tota-Maharaj & McMahon, 2021).

Das **Repurposing** von Windkraftanlagen hat das Ziel, alternative Verwendungen für Komponenten und Teile zu finden, die über ihren ursprünglichen Zweck hinausgehen und in der Regel einen niedrigeren Wert im Sinne der CE haben (Zhang et al., 2023). Diese EoL-Management-Strategie findet üblicherweise nur bei den Rotorblättern Einsatz, wobei sich eine Vielzahl an Start-ups mit der Kommerzialisierung von Rotorblätter-Repurposing befassen (Delaney et al., 2023). Beispiele dafür sind Fußgängerbrücken, Kinderspielplätze, Fahrradunterstände, Parkbänke, Kunstinstallationen sowie Schallschutzelemente und Lärmschutzwände. Obwohl die Möglichkeiten vielfältig sind, beschränken sich die meisten dieser Ideen auf Pilotprojekte, was eine großmaßstäbliche Industrialisierung schwierig macht (Delaney et al., 2023; Joustra et al., 2021; Zhang et al., 2023).

Beim **Recycling** von stillgelegten Windkraftanlagen werden Materialien aufbereitet und dem jeweiligen Materialkreislauf zurückgeführt (BMK, 2022). Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, sind 96,1 % der Gesamtmasse von Windkraftanlagen Beton und Eisen-Metallen zuzuordnen. Der Großteil davon ist im Fundament, Turm, der Gondel sowie der Rotornabe verbaut (siehe Abbildung 2.4). Diese Materialien eignen sich ausgezeichnet für ein Recycling, so kann Beton abgerissener Fundamente und Türme als Baumaterial und Eisen-Metalle, Aluminium und Kupfer unendlich oft recycelt werden (Tota-Maharaj & McMahon, 2021). Rotorblätter oder Gondelgehäuse aus Glasfaserverstärktem (GFK) und Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) können mechanisch (zerkleinern, trennen und weiterverwenden), thermisch (z. B. durch Pyrolyse) oder chemisch (z. B. durch Solvolyse) recycelt werden. Es existieren darunter auch kommerziell nutzbare Verfahren für beide Materialien, diese sind jedoch deutlich aufwendiger und weniger etabliert als bei anderen üblichen Materialien von Windkraftanlagen. Das mechanische Recycling für GFK sowie die Pyrolyse für CFK gelten dabei als die einzigen Prozesse mit einer kommerziell verfügbaren technischen Reife (Deutsches Umweltbundesamt, 2022). Rotorblätter werden derzeit nur mit duroplastischer Matrix (z. B. Polyester- oder Epoxidharz) hergestellt. Thermoplastische Polymere sind nach ihrer Sortierung recyclingfähig, auch wenn diese Prozesse mit Qualitätsverlusten verbunden sind (Zhang et al., 2023).

Die EoL-Strategie **Recover**, also die thermische Verwertung zur Energierückgewinnung, kann für GFK, CFK und Kunststoffen eingesetzt werden (Mishnaevsky, 2021; Zhang et al., 2023). Die Mitverbrennung von GFK beispielsweise in Zementöfen ist dabei eine gängige Praxis, wobei die Energieausbeute gering bleibt und das Material größtenteils verloren geht (Joustra et al., 2021).

Entgegen den Ansätzen der CE kommt es global häufig zur zumindest teilweisen **Deponierung** alter Windkraftanlagen, so verbleiben nach der Stilllegung häufig Fundamente alter Windkraftanlagen vollständig am Standort und Rotorblätter werden nach deren Abtransport oftmals auf Deponien vergraben (Gast et al., 2024). Dies kann zu verzögerten Umweltschäden wie der Verschmutzung von Boden und Grundwasser führen (Zhang et al., 2023), weshalb Deutschland sowie in einigen weiteren Ländern der Europäischen Union die Deponierung von faserverstärkten Kunststoffen wie GFK und CFK verboten haben (Tota-Maharaj & McMahon, 2021).

Die hier beschriebenen EoL-Strategien bilden die Basis für die Szenario-Analysen in Kapitel 5.

3 State-of-the-Art / Literaturanalyse

Die Systematische Literaturanalyse (SLR) nach Tranfield et al. (2003) sowie Forward und Backward Reference Searching (FBRS) werden in diesem Kapitel verwendet, um relevante Beiträge der Wissenschaft für diese Diplomarbeit zu identifizieren. In den Kapiteln 3.1 bis 3.4 wird die SLR unter der beschriebenen Erweiterung durch FBRS geplant, durchgeführt und ein Bericht erstellt, der deskriptive und thematische Analysen umfasst. Die verwendeten Methoden sind in den Kapiteln 4.1 und 4.2 ausführlich beschrieben.

3.1 Planung des Reviews

Die Methodik und Vorgehensweise bei der hier angewandten Literaturanalyse ist in Abbildung 3.1 veranschaulicht, wobei die systematische Literatuuranalyse nach Tranfield et al. (2003) in Stufe II durch das Forward und Backward Reference Searching (FBRS) erweitert wird. Die SLR wird dadurch vervollständigt und um zusätzliche Perspektiven bereichert. Als Ausgangspunkt für das FBRS wird zunächst eine Sammlung an relevanter Kernliteratur definiert, die sich aus den durch die SLR inkludierten sowie weiteren im Zuge der Bearbeitung dieser Diplomarbeit für wesentlich erachteten Publikationen zusammensetzt. Schrittweise werden durch das FBRS weitere Quellen identifiziert, die ebenfalls einem dreistufigen Screening-Prozess

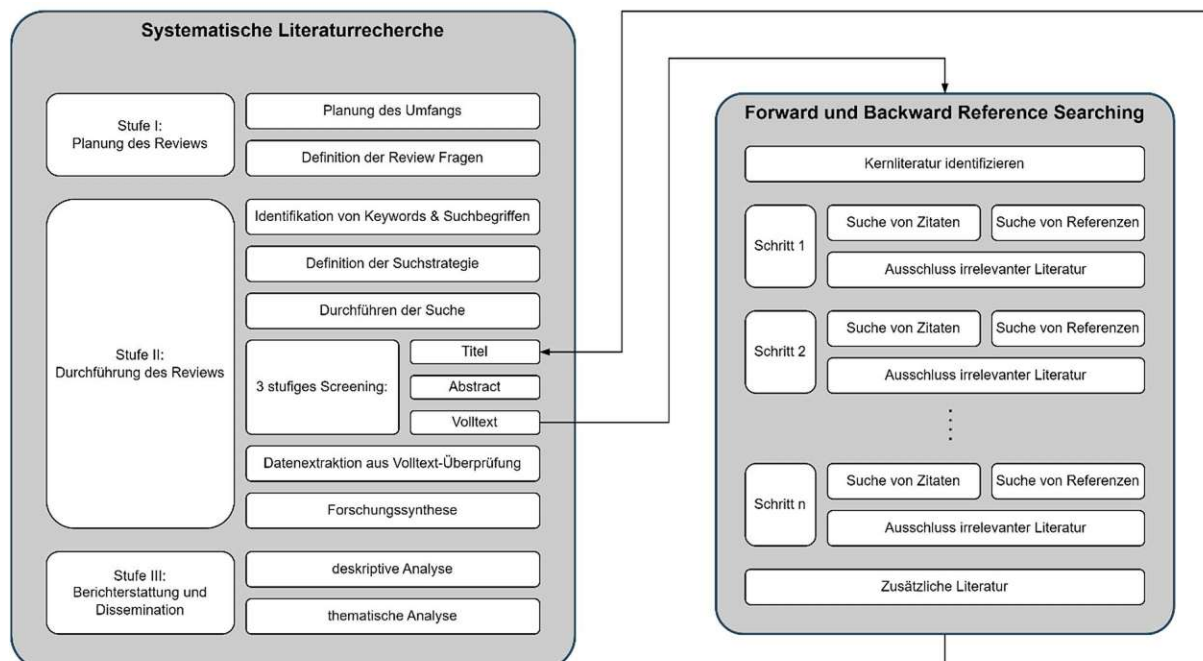


Abbildung 3.1: Vorgehensweise bei der Literaturanalyse dieser Diplomarbeit (Hinde & Spackman, 2015; Tranfield et al., 2003)

unterzogen werden und, sofern diese die nachfolgend definierten Aus- und Einschlusskriterien erfüllen, in die Analyse einfließen. Daraus ergibt sich erneut die Kernliteratur für den nachfolgenden Schritt, dieser Prozess wiederholt sich so lange, bis keine neue Literatur identifizierbar ist. Die Datenextraktion der durch die SLR und der FBRS inkludierten Publikationen folgen dem Flussdiagramm in Abbildung 3.1 (Hinde & Spackman, 2015; Tranfield et al., 2003).

Ziel dieser Literaturanalyse ist die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, die gleichzeitig zur Review-Frage dieser SLR wird. Diese lautet wie bereits in Kapitel 1.2 definiert: *Was ist der aktuelle Stand der Forschung bezüglich Ökobilanzierung von EoL-Strategien in der Windindustrie?* Es werden die ökologischen Auswirkungen sowie die LCA-Methodik verschiedener End-of-Life-Strategien bzw. deren Vorhandensein in der verfügbaren Literatur analysiert.

3.2 Durchführung des Reviews

Die Durchführung des Reviews beginnt mit der Identifikation von Keywords und Suchbegriffen aus der Review-Frage, diese sind **Ökobilanzierung**, **EoL** und **Windindustrie**. Für eine umfassende Suche war es essenziell, mögliche Synonyme oder ähnliche Begriffe in die Suchstrategie zu integrieren, diese sind in Tabelle 3.1 unter ‚Suchbegriffe‘ zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Keywords, zugehörige Synonyme und ähnliche Suchbegriffe der Literaturanalyse

Keywords	Suchbegriffe
Ökobilanzierung	LCA, life cycle analysis, lifecycle analysis, life cycle assessment, lifecycle assessment, environmental footprint analysis
EoL	eol, e-o-l, end of life, end-of-life, end-of-use, end of use, end of service life, disposal, life extension, repower, renewal, decommissioning, reuse, remanufacture, repurpose, recycle, repair, recover, landfill
Windindustrie	wind

Für die Suche wird Scopus verwendet, da sie einer der größten und vertrauenswürdigsten Datenbanken für die akademische Forschung darstellt (Baas et al., 2020). Die Dokumentensuche wurde am 4. September 2024 in Scopus mit den in Tabelle 3.1 definierten Suchbegriffen und booleschen Operatoren für Titel, Abstract und Keywords wie folgt abgefragt:

TITLE-ABS-KEY ((lca OR “life cycle analysis” OR “lifecycle analysis” OR “life cycle assessment” OR “lifecycle assessment” OR “environmental footprint analysis”) AND (eol OR e-o-l OR “end of life” OR “end-of-life” OR end-of-use OR “end of use” OR “end of service life” OR disposal OR “life extension” OR repower OR renewal OR decommissioning OR reuse OR remanufacture OR repurpose OR recycle OR repair OR recover OR landfill) AND (wind))

Als einziges Suchkriterium wurden als Sprachen Deutsch und Englisch festgelegt. Eine Einschränkung der Veröffentlichungsjahre wurde nicht getroffen, da es sich um ein vergleichsweise neues Feld der Wissenschaft handelt. Die Suche ergab nach Anwendung der Ein- und Ausschlusskriterien 267 Dokumente.

Eine zuvor durchgeführte Analyse mit der Anfrage

TITLE-ABS-KEY ((lca OR "life cycle analysis" OR "life cycle assessment") AND ("end of life" OR end-of-life OR eol OR e-o-l) AND (wind))

ergab unter Berücksichtigung ausschließlich deutsch- und englischsprachiger Literatur hingegen nur 97 Ergebnisse. Deshalb wurde die Suche wie zuvor beschrieben verfeinert und um weitere Suchbegriffe erweitert.

Screening-Prozess

Die 267 am 4. September 2024 gefundenen Dokumente werden zunächst auf Duplikate überprüft und anschließend einem Screening-Prozess unterzogen, bestehend aus Titel- & Abstract- sowie Volltext-Screening, wonach festgelegt wird, welche Quellen in der systematischen Literaturrecherche berücksichtigt werden. Abbildung 3.2 veranschaulicht diesen Screening-Prozess in Anlehnung an das PRISMA Statement (Moher et al., 2009). Die im Volltext-Screening in die SLR inkludierte Literatur sowie die darin beschriebenen Windkraftanlagen oder deren Komponenten müssen weitere Kriterien erfüllen, Ausschlussgründe während des Volltext-Screenings sind:

- Grund 1: Die Turbinen müssen Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT) mit drei Rotorblättern sein.
- Grund 2: Zumindest eine EoL-Strategie der CE muss einen ausreichenden, ökologisch quantifizierbaren Stand der Technik erfüllen (Technologiereifegrad ≥ 6).
- Grund 3: Die Publikation muss mindestens eine EoL-Strategie der CE betrachten.
- Grund 4: Nur Publikationen, die detaillierte Informationen zu den betrachteten End-of-Life-Strategien, den eingesetzten Technologien und Materialien sowie zu quantitativen Umweltwirkungen lieferten, wurden berücksichtigt.
- Grund 5: Die Publikation muss frei zugänglich sein.

Nach dem Screening Prozess und Anwendung der genannten Kriterien verbleiben 19 Publikationen in der durch die SLR inkludierten Literatur. Das FBRS bereichert wie nachsehend beschrieben die berücksichtigte Literatur um 8 weitere Publikationen.

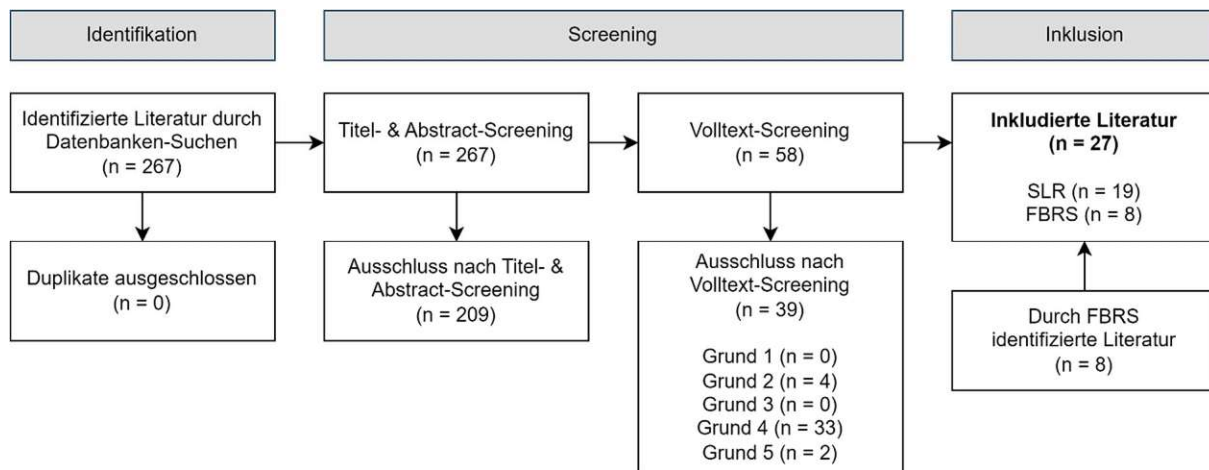


Abbildung 3.2: Flussdiagramm der systematischen Literaturrecherche in Anlehnung an das PRISMA-Statement (Moher et al., 2009)

Identifikation weiterer Publikationen durch Forward und Backward Reference Searching

Als Ausgangspunkt für das Forward und Backward Reference Searching dient die Kernliteratur, die aus 19 Publikationen der inkludierten Literatur der Systematischen Literaturrecherche und zwei weitere im Zuge der Erarbeitung dieser Diplomarbeit als besonders relevant gekennzeichnete Werke besteht, diese sind nachfolgend angeführt:

- A Framework and Baseline for the Integration of a Sustainable Circular Economy in Offshore Wind (Velenturf, 2021)
- A bibliometric, social network and clustering analysis for a comprehensive review on end-of-life wind turbines (Eligüzel & Özceylan, 2022)
- 19 Publikationen aus SLR (Beschreibung siehe Kapitel 3.4)

Das FBRS konnte ebenfalls mit Scopus durchgeführt werden, wobei zuerst eine Liste erstellt wurde, diese umfasst die 21 Publikationen der Kernliteratur. Anhand der integrierten Funktionen ‚view cited by‘ and ‚view references‘ konnten ausgehend von einem definierten Pool an Literatur, alle früheren Publikationen, die die Literatur in diesem Pool zu einem späteren Zeitpunkt referenzieren, erfasst werden. Der Vorteil dabei ist, dass mehrfach genannte Zitationen und Referenzen der Kernliteratur nur einmal pro Schritt berücksichtigt werden müssen. Das Flussdiagramm in Abbildung 3.3 veranschaulicht das Vorgehen während des FBRS. Im ersten Schritt der in Abbildung 3.1 beschriebenen Vorgehensweise für das FBRS wurden auf Scopus insgesamt 1 258 Referenzen und 526 Zitate in Bezug auf die Kernliteratur identifiziert. Diese wurden demselben dreistufigen Screening-Prozess (gleiche Ausschlusskriterien) wie in der vorangegangenen Literaturrecherche unterzogen. Der erste Iterationsschritt liefert 8 neue inkludierte Werke, die zugleich den Ausgangspunkt für den zweiten Schritt des FBRS bilden. Im zweiten Schritt identifizierte das Backward Reference Searching 345 Dokumente und das Forward Reference Searching 224 Dokumente, wobei der Großteil bereits in Schritt 1 des FBRS oder durch die SLR

erfasst und daher nicht erneut berücksichtigt wurde. Beim Volltext-Screening fand sich lediglich eine Publikation, die ausgeschlossen werden musste. Damit ist das Abbruchkriterium erreicht und das FBRS abgeschlossen.

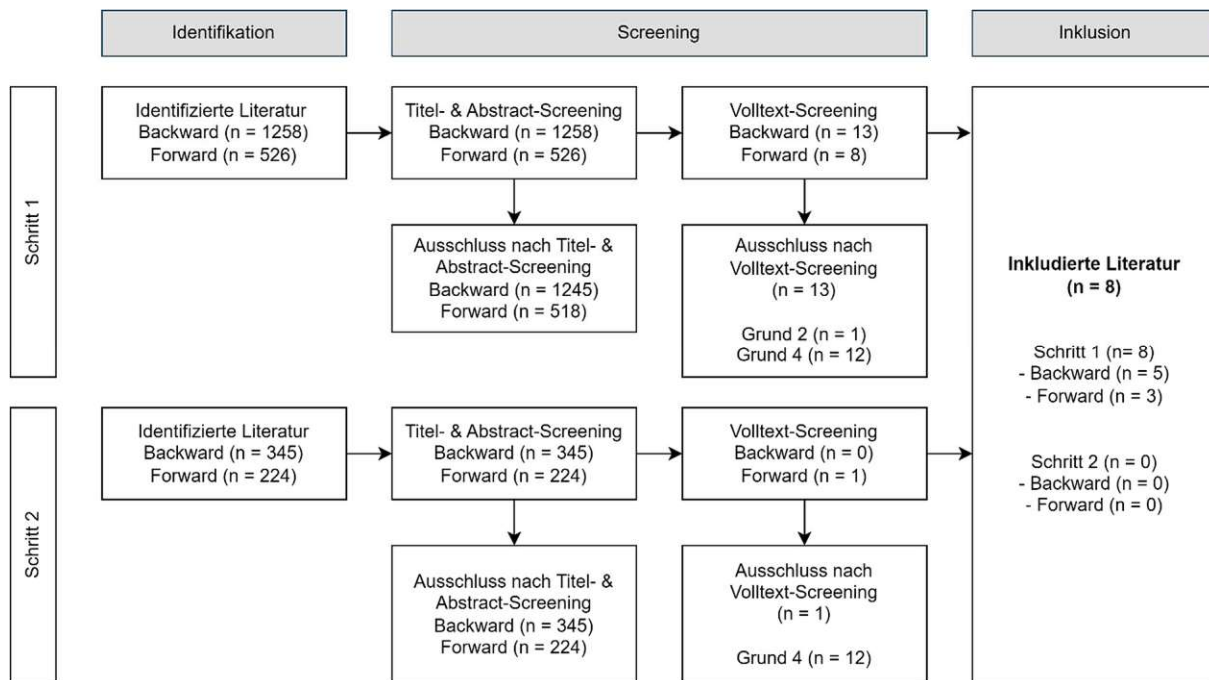


Abbildung 3.3: Flussdiagramm des Forward und Backward Reference Searching in Anlehnung an das PRISMA-Statement (Moher et al., 2009)

3.3 Deskriptive Analyse

In diesem und im nächsten Kapitel wird die zuvor beschriebene Literatur analysiert und relevante Information extrahiert. Die hier angeführte deskriptive Analyse gibt einen Überblick über die identifizierte Literatur des Reviews in Bezug auf Erscheinungsdatum, Region und weiteren vorkommenden Keywords. Die thematische Analyse diskutiert später relevante Inhalte der inkludierten Literatur und dient der Identifikation der Forschungslücken.

Die deskriptive Analyse stützt sich auf die in Scopus nutzbaren Analyseindikatoren, wobei die 267 Publikationen der initialen Scopus-Keyword-Suche vom 4. September 2024 berücksichtigt werden. Diese Indikatoren umfassen eine Kategorisierung der Dokumente nach Jahren, Autoren, Ländern und Geldgeber.

Abbildung 3.4 zeigt die jährliche Verteilung der durch die Keyword-Suche erfassten Dokumente. Ein klarer Trend hin zu einem gestiegenen Forschungsinteresse ist dabei erkennbar, allein in den letzten 5 Jahren wurden über 60 % der identifizierten Literatur veröffentlicht. Der Forschungsbereich ist zwar nicht neu, dennoch lässt sich der kürzliche Anstieg mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Dringlichkeit der immer größer werdenden Anzahl an Windkraftanlagen, die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, zurückführen. Die Summe der Publikationen für das Jahr 2024 sind hier nur bis zum 4. September 2024 inkludiert.

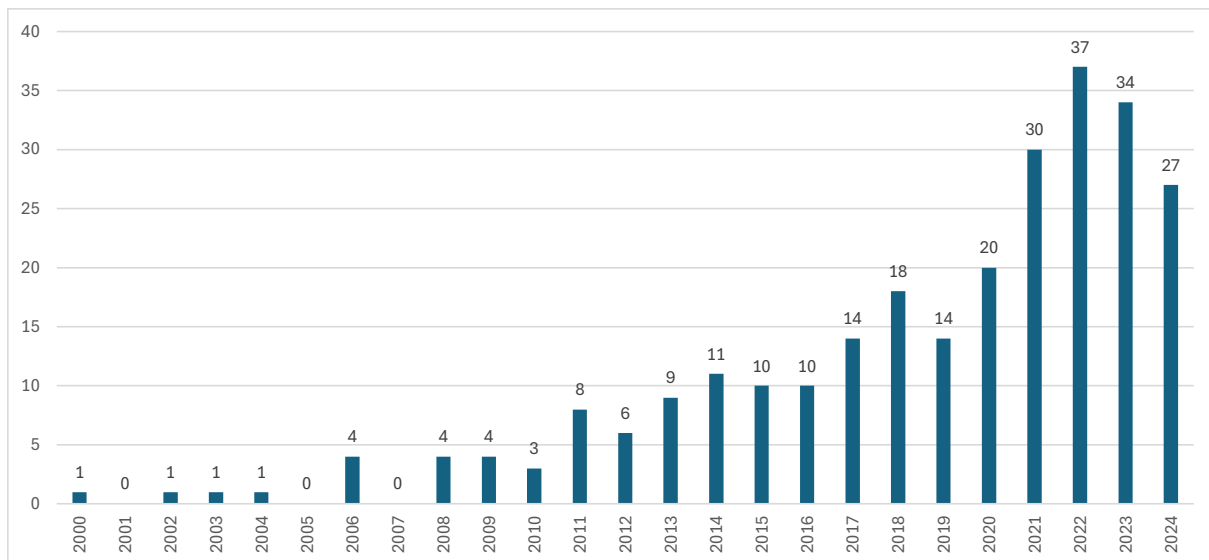


Abbildung 3.4: Jährliche Anzahl an Publikationen der Keyword-Suche in Scopus

Die nachstehende Abbildung 3.5 veranschaulicht die globale Verteilung der Publikationen anhand der wichtigsten Länder. Die Vereinigten Staaten führen das Länderranking als einzelne Nation mit 52 Publikationen deutlich an. Insgesamt umfasst die Suche Ergebnisse aus 53 Herkunftsländern, wobei 150 (56 %) der 267 erfassten Publikationen aus EU-Mitgliedsstaaten stammen. Dies zeigt, dass Europa die treibende Kraft in diesem Forschungsbereich darstellt.

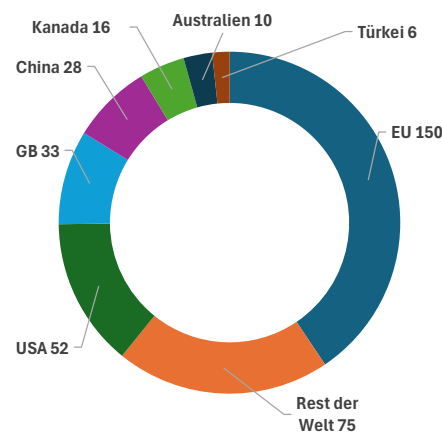


Abbildung 3.5: Verteilung der Publikationen nach Herkunftsland der Keyword-Suche in Scopus

In der Analyse der Fördermittelgeber sind insbesondere die Europäische Kommission, die National Science Foundation, die National Natural Science Foundation of China sowie Publikationen, die im Rahmen des Horizon 2020 Framework Programme finanziert wurden, hervorzuheben. Insgesamt sind 152 Geldgeber an der Finanzierung dieser Forschung involviert, was ein breit verstreutes Forschungsinteresse bestätigt.

Wie in Abbildung 3.6 dargestellt wurden 250 der 267 Publikationen in Zeitschriften veröffentlicht, allen voran das Journal of Cleaner Production mit 23 Artikeln.

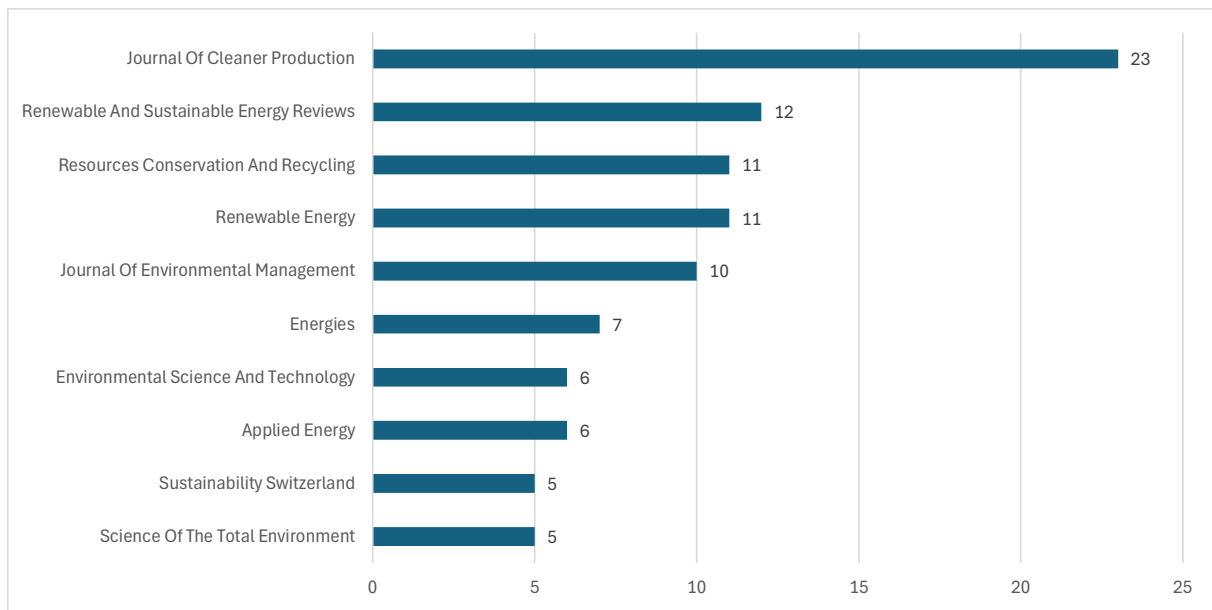


Abbildung 3.6: Publikationen nach Zeitschriften der Keyword-Suche in Scopus

Die zehn häufigsten Keywords der 267 Publikationen auf Scopus gefundenen Publikationen sind in Abbildung 3.7 zu finden. Auffällig ist, dass Recycling als einzelne EoL-Strategie darin vorkommt. In vielen Publikationen wird Recycling in einem deutlich breiteren Kontext gesehen als in Kapitel 2 dieser Arbeit definiert. Recycling beschränkt sich somit oftmals nicht nur auf die Aufbereitung von Materialien, um sie in hoher Qualität dem Materialkreislauf zurückzuführen, sondern kann auch weitere EoL-Strategien wie Repurpose oder Recover umfassen, die in der vorliegenden Diplomarbeit als eigenständige Strategien abgegrenzt wurden.

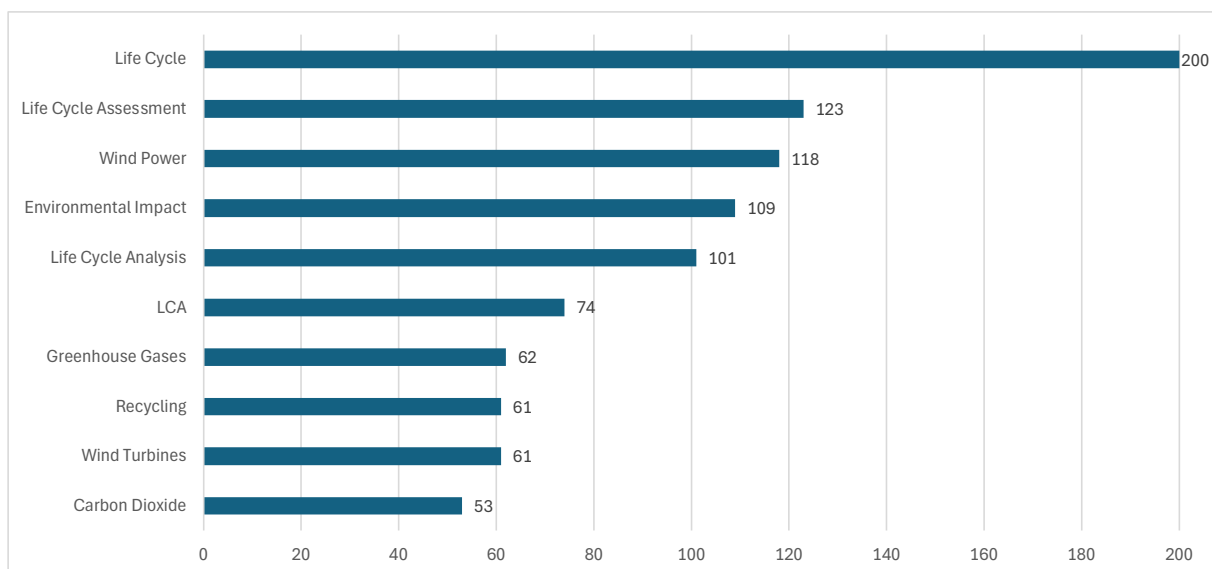


Abbildung 3.7: Häufigste Keywords in den Publikationen der Keyword-Suche in Scopus

3.4 Thematische Analyse

Die thematische Analyse der systematischen Literaturanalyse beschäftigt sich mit den insgesamt 27 Publikationen der inkludierten Literatur, wobei 19 aus der Keyword-Suche in Scopus und 8 aus dem Forward & Backward Reference Searching stammen. Sie befasst sich mit der Beantwortung der bereits in Kapitel 1.2 definierten und in der Planung des Reviews verwendeten Forschungsfrage: *„Was ist der aktuelle Stand der Forschung bezüglich Ökobilanzierung von EoL-Strategien in der Windindustrie?“*. Die inkludierte Literatur umfasst Quellen, die einzelne Komponenten, ganze Anlagen oder Windparks betrachten. Zentral ist hierbei, dass sie zumindest eine EoL-Strategie der CE in einer ausreichenden Detailtiefe untersuchen. Methodisch setzen sich die 27 Publikationen der inkludierten Literatur größtenteils aus LCA-Studien (23x) zusammen, wobei auch Literatur Reviews (4x) wertvolle Informationen liefern.

In der umfassenden LCA-Betrachtung unterscheidet man upstream, operative und downstream Prozesse. Upstream Prozesse sind die Rohstoffgewinnung, die Herstellung sowie die Kommissionierung der Windkraftanlage, die operativen Prozesse befassen sich mit der Stromerzeugung, dem Betrieb und der Wartung und die downstream Prozesse umfassen die Demontage sowie die jeweiligen EoL-Szenarien (Kyllili, 2022). Die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführte Literaturanalyse widmet sich bis auf Ausnahmen ausschließlich der EoL-Betrachtung von Windkraftanlagen, wobei späteren Publikationen in Bezug auf den Stand der Technik mehr Gewichtung geschenkt wurde. Die in den Lebenszyklusanalysen vorkommenden Einflusskategorien wurden zur Steigerung der Konsistenz mit der verwendeten Literatur in englischer Sprache weiterverwendet.

Der Aufbau der folgenden Unterkapitel der thematischen Analyse untergliedert sich in einen Überblick der inkludierten Literatur, der Schwerpunkte sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede der inkludierten Literatur betrachtet. Danach werden Details zur LCA-Methodik der berücksichtigten Studien, darunter Einflusskategorien, Cut-off-Kriterien, und betrachtet Ansätze zur Vereinfachung besprochen. Die EoL-Betrachtungen von Windkraftanlagen werden ebenfalls diskutiert, wobei eine Strukturierung in ‚EoL-Betrachtung von Windkraftanlagen (ohne Rotorblätter)‘ und ‚EoL-Betrachtung von Rotorblättern‘ aufgrund der Konstellation der inkludierten Literatur sowie der großen Unterschiede in den verwendeten Materialien für sinnvoll erachtet wurde. Zuletzt wird die Forschungslücke identifiziert und es werden erkennbare Trends in Bezug auf moderne Windkraftanlagen dargestellt.

Überblick der inkludierten Literatur

Im Allgemeinen müssen Vergleiche von LCA-Studien immer unter besonderer Vorsicht betrachtet werden, da diese unterschiedliche Umfänge, Annahmen, methodische Entscheidungen, modellierte Technologien, Systemgrenzen und Spezifikationen

umfassen (Kylili, 2022; Pincelli et al., 2024). Tabelle 3.2 zeigt die 23 in diesem Review inkludierten LCA-Studien mit ihren wichtigsten Informationen. Es ist erkennbar, dass ein Großteil dieser Publikationen europäische Anlagen untersuchen. 13 bzw. 6 der Studien befassen sich dabei explizit mit On- bzw. Offshore-Windkraftanlagen mit Nennleistungen von 500 kW bis 6 MW. In der Analyse der unterschiedlichen Komponenten ist auffällig, dass fast alle (20x) LCA-Studien Rotorblätter zumindest teilweise berücksichtigen, weitere WKA-Komponenten sind darin deutlich seltener vertreten. Die häufigste Annahme für die Lebensdauer in den Lebenszyklusanalysen ganzer Windkraftanlagen ist dabei 20 Jahre, wobei auch längere Zeiträume sowie eine Lebensdauerverlängerung auf bis zu 40 Jahre vorkommen. Das Global Warming Potential fand in jeder der untersuchten LCA-Studien Berücksichtigung und wurde somit deutlich häufiger eingesetzt als weitere Einflusskategorien wie das Acidification Potential (11x), das Ozone Depletion Potential (10x), das Eutrophication Potential (10x), das Photochemical Ozone Creation Potential (9x), die Human Toxicity (9x), die Ecotoxicity (8x) oder die verbleibenden Einflusskategorien. GaBi und SimaPro waren die beliebtesten LCA-Softwares und ecoinvent die am öftesten verwendete LCI-Datenbank für die inkludierten LCA-Studien. Auffällig war, dass höherwertige CE-Strategien (vgl. Kapitel 2.1.2), wie die Lebensdauererweiterung (4x), Repowering (1x), Reuse (2x) und Repurposing (5x), deutlich seltener vertreten waren als Recycling (22x), Recover (11x) oder die lineare Strategie der Deponierung (15x).

Neben den 23 inkludierten Lebenszyklusanalysen wurden 4 Literaturreviews als relevante Literatur eingeschlossen. Kylili (2022) beschäftigt sich sehr umfassend mit Lebenszyklusanalysen von Windkraftanlagen und analysiert dabei deren Unterschiede, Gemeinsamkeiten sowie mit Stärken und Schwächen in der Methodik, dem Aufbau, den Annahmen sowie den Ergebnissen. Mello et al. (2022) widmen sich allgemein der Beurteilung von Umweltauswirkungen in der EoL-Phase von Windparks und stützen sich dabei auf die Lebenszyklusanalyse.

Jani et al (2022) erforscht anhand einer Literaturanalyse unterschiedliche Recycling- und Reuse-Möglichkeiten von Rotorblatt-Materialien. Mendecka & Lombardi (2019) entwickeln anhand ihres Reviews eine vereinfachte Methode zur Erstellung von Lebenszyklusanalysen von Windkraftanlagen, über deren gesamten Lebenszyklus durch die Verwendung von Daten verschiedener Windkraftanlagen und Ableitung mathematischer Zusammenhänge.

3.4.1 Allgemeine EoL-Betrachtung von Windkraftanlagen

Laut Bonou et al. (2016) ermöglicht die EoL-Phase eine Verringerung der Umwelteinflüsse von Windkraftanlagen um 20–30 %. Die LCA-Ergebnisse betrachteter Turbinen sind äußerst sensibel auf Veränderungen der Windgeschwindigkeiten, Lebensdauer sowie Effizienz. Die Einflusskategorie Global Warming Potential war lt. Bonou et al. (2016) ein guter Indikator für Umweltperformance.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der in der Literaturanalyse inkludierten LCA-Studien

Publikation	Windkraftanlage						Lebenszyklusanalyse			Kreislaufwirtschaft							
	Ort	Leistung	Systemkomponenten				Lebensdauer	Scope			EoL-Strategien						
			Rotor	Gondel	Turm	Fundament		cradle-to-grave	cradle-to-gate	gate-to-gate	Lebensdauererweiterung	Reuse & Remanufacture	Repower	Repurpose	Recycle	Recover	Deponie
Gervásio et al. (2014)	-	2 - 5 MW			•	•	20 & 40 Jahre	•			•	•			•		•
Bonou et al. (2016)	Europa	2,3 - 6 MW	•	•	•	•	20 & 25 Jahre	•							•	•	
Jin et al. (2016)	-	-		•			-		•						•		
Jiang et al. (2018)	China	2 MW					16,045 Jahre	•				•			•		
Martínez et al. (2018)	Spanien	0,66 - 2 MW	•	•	•	•	20 Jahre			•			•		•		•
Jensen (2019)	-	60 MW Windpark	•	•	•	•	-		•						•		
Alsaleh & Sattler (2019)	USA	2 MW	•	•	•	•	20, 25 & 30 Jahre	•			•				•	•	•
Pillain et al. (2019)	-	-	•				-			•					•	•	•
Liu et al. (2021)	China	1,5 MW	•	•	•	•	20 Jahre	•							•	•	•
Hanes et al. (2021)	USA		•												•	•	•
Nagle et al. (2022)	Irland	-	•				-			•				•			
Sommer et al. (2022)	Europa	-	•				-			•				•	•	•	
Li et al. (2022)	Global	5 MW	•	•	•	•	20 - 25 Jahre	•			•				•	•	•
Ozsahin et al. (2022)	Türkei	2,5 MW	•	•	•	•	25 Jahre	•							•		•
Gennitsaris et al. (2023)	Griechenland	850 kW	•	•	•	•	-			•				•	•		•
Cong et al. (2023)	China	1,5 - 2 MW	•				20 Jahre	•		•					•	•	
Diez-Cañamero & Mendoza (2023)	Spanien	4,5 MW	•				20 Jahre	•						•	•	•	•
Johst et al. (2023)	-	500 kW	•				-		•					•			
Sproul et al. (2023)	USA	-	•				-			•					•	•	•
Sobaszek et al. (2023)	Polen	2 MW (Vestas V90)	•	•	•	•	25 Jahre	•							•		•
Delogu et al. (2023)	-	-		•			-			•					•		
Pincelli et al. (2024)	Neuseeland	4,3 MW	•	•	•	•	30 Jahre	•							•		•
Pender et al. (2024)	Großbritannien	5 - 15 MW	•				-			•					•	•	•
Cao et al. (2024)	China	5 MW	•	•	•	•	20 ± 5 Jahre	•			•				•		•
Summe			20	13	12	12		12	3	9	4	2	1	5	22	11	15

Lebensdauererweiterung

Li et al. (2022) kommen zu dem Schluss, dass die Verlängerung der Betriebsdauer eines Offshore-Windparks von 20 auf 25 Jahre deren Treibhausgas-Intensität (je MWh) um ca. 11 % senkt (Li et al., 2022). Alsaleh und Stattler (2019) zeigen anhand einer LCA-Studie von 2 MW Windkraftanlagen in einem 400 MW Windpark, dass die Lebensdauererweiterung von 20 auf 25 bzw. 30 Jahre eine Reduktion der THG-Emissionen um 19,9 % bzw. 33,0 % bewirkt. Zur Untersuchung der Umwelteinflüsse einer Lebensdauererweiterung von Türmen und Fundamenten von Windkraftanlagen haben Gervásio et al. (2014) in ihrer LCA-Studie angenommen, dass diese während einer Lebensdauer von 20 Jahren keine Wartungsarbeiten benötigen. Werden sie hingegen im Zuge einer Erweiterung der Lebensdauer für 40 Jahre genutzt, kommen einige Sanierungsarbeiten zum Einsatz. Ein Großteil der Wartungsarbeiten entfällt in der Regel auf die Gondel und den Rotor, weshalb sie für den Turm und das Fundament als vernachlässigbar betrachtet wurden (Gervásio et al., 2014). Cao et al. (2024) haben in ihrer Lebenszyklusanalyse einer Windkraftanlage für die Lebensdauer von 25 Jahren angenommen, dass im Zuge von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten 15 % der Generatorkomponenten ausgetauscht werden müssen (Cao et al., 2024).

Reuse

Gervásio et al. (2014) haben in ihrer vergleichenden LCA-Studie die Umweltauswirkungen von Reuse (20 Jahre Nutzungsdauer und weitere 20 Jahre Nutzungsdauer an einem anderen Ort) von Türmen und Fundamenten von Stahl-, Beton- und Hybridtürmen für Windkraftanlagen mit 2–5 MW untersucht. Dabei wird berücksichtigt, dass nach 20 Jahren am neuen Standort ebenfalls ein weiteres Fundament errichtet werden muss. Wenig überraschend sind die Ergebnisse, dass Betontürme ein Einsparungspotenzial der THG-Emissionen (in CO₂-Äq.) von weniger als 1 %, Hybridtürme 7–9 % und Stahltürme 23–32 % aufweisen. Reuse lohnt sich in dieser vergleichenden LCA-Studie aus Umweltperspektive zunehmend mit steigender Anlagengröße (Gervásio et al., 2014).

Die LCA-Studie von Jiang et al. (2018) errechnet unter Anwendung eines mathematischen Modells eine durchschnittliche Lebensdauer von 16,045 Jahren für das Getriebe einer 2 MW Windkraftanlage. Das bedeutet, dass 1,25 Getriebe für die Lebensdauer von 20 Jahren der Windenergieanlage benötigt werden. Die Fallstudie zeigt, dass durch die Wiederverwendung eines Getriebes eine Reduktion der Umweltauswirkungen von rund 10 % bewirkt wird (Jiang et al., 2018).

Repower

Oft stehen alte Windkraftanlagen an Orten mit ausgezeichneten Windverhältnissen, diese haben eine geringere Effizienz und Anlagenleistung als moderne Anlagen, wodurch die Flächen nicht optimal genutzt werden. In diesen Fällen ist ein Repowering

und die damit verbundene Erhöhung der produzierten Energie besonders relevant. Martínez et al. (2018) untersuchen in ihrer LCA-Studie das Full Repowering eines Windparks in Spanien, wobei 37 Windkraftanlagen mit 660 kW samt deren Fundamenten durch 17 Windkraftanlagen mit 2 MW ersetzt werden. Die installierte Gesamtleistung des Windparks steigt dadurch von 24,4 MW auf 34 MW (+41.7 %) und einige der alten Fundamente werden für die verringerte Anzahl neuer Anlagen vergrößert. Das Mittelspannungsnetz kann dabei teilweise weiterverwendet werden, benötigt aber einen deutlichen Ausbau. Im vorliegenden Szenario wurde angenommen, dass der Windpark bereits nach 7 Jahren durch Repowering erneuert wird und danach weitere 20 Jahre betrieben wird. Die Umweltbewertung von Repowering ist dabei nicht trivial und hängt stark vom Umfang der Modernisierung ab. Der Umweltnutzen entsteht großteils im Betrieb der Windkraftanlagen, durch die effizientere Nutzung der Flächen und durch die höhere Ausbeute an elektrischer Energie sowie durch die dadurch vermiedene Produktion durch CO₂-intensive Quellen. Vergleicht man nun den Betrieb der ursprünglichen Anlage über die geplante Lebensdauer von 20 Jahren mit einem Repowering nach 7 Jahren und dem Betrieb für weitere 20 Jahre, so kommt die vorliegende Studie in allen zehn betrachteten Einflusskategorien zu dem Ergebnis, dass Repowering des Windparks aus Umweltsicht die effizientere Strategie ist. In der LCA-Studie von Martínez et al. (2018) senkt Repowering die Umweltbelastungen der Windenergieanlage um 8,7–75,4 % in den betrachteten Einflusskategorien. Mello et al. (2022) sprechen in ihrer Literaturanalyse sogar davon, dass die Betriebsdauer durch Repowering auf insgesamt bis zu 50 Jahre verlängert werden kann (Mello et al., 2022).

Recycling, Recover und Deponie

In der inkludierten Literatur wurden in der EoL-Betrachtung ganzer Windkraftanlagen in der Lebenszyklusanalyse oft Szenarien definiert, die Recycling, Recover und die Deponierung der verschiedenen Komponenten und Materialien demontierter Turbinen umfassen. Dabei wurden üblicherweise Recycling-Quoten für Metalle wie Stahl, Eisen, Aluminium und Kupfer von 90–100 % angenommen (Cao et al., 2024; Gennitsaris et al., 2023; Jiang et al., 2018; Liu et al., 2021; Martínez et al., 2018; Ozsahin et al., 2022; Pincelli et al., 2024). In seltenen Fällen auch deutlich weniger, wie beispielsweise in der Studie von Cong et al. (2023), wo 50 % als Recycling-Quote für diese Metalle angenommen wurde.

In einer LCA-Studie von Pincelli et al. (2024) wurde ein 176 MW Windpark in Neuseeland, bestehend aus 4,3 MW Windkraftanlagen mit zugehöriger Elektronik, Kabel und Transformatoren, betrachtet. Die Recycling-Quoten für Stahl, Kupfer und Aluminium wurden mit 90 % angenommen. Es wurde gefolgert, dass das Metallrecycling in der EoL-Phase das Potential hat, die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen um 28 % (- 3,0 g CO₂/kWh) zu senken. Die

von Pincelli et al. (2024) durchgeführten Literaturanalyse kommt zu dem Ergebnis, dass Recycling die Treibhausgasemissionen um 20–40 % reduzieren.

Sobaszek et al. (2023) untersuchen eine Vestas V90 Windkraftanlage inklusive zugehörigem Transformator und zugehöriger Elektrik in ihrer LCA-Studie. Die Stückliste mit den vorkommenden Materialien wurde dabei detailliert aufgearbeitet und die verschiedenen Umweltauswirkungen anhand der IMPACT 2002+ Methodik in hoher Präzision aufgelöst.

Ozsahin et al. (2022) untersuchten unter anderem die Auswirkungen der EoL-Phase eines türkischen Windparks anhand eines für diese Region stellvertretenden Szenarios, wobei 90 % des Stahls, Aluminiums und Kupfers sowie 100 % der Metalle der elektrischen Ausstattung recycelt wurden, die verbleibenden Komponenten wie Kunststoffe, Beton oder Holz wurden durch eine Entsorgung auf der Deponie modelliert. Auch diese LCA-Studie kommt zu dem Ergebnis, dass dadurch in acht von neun Einflusskategorien eine Reduktion der Umwelteinflüsse in der EoL-Phase der Größenordnung von 20–30 % (GWP 28 %) bewirkt wird. Einzig das Ozone Layer Depletion Potential steigt hierbei durch den EoL-Prozess.

In einer LCA-Studie eines 49,5 MW Windparks bestehend aus 1,5 MW Windkraftanlagen kommen Liu et al. (2021) zu dem Schluss, dass das Recycling der Metalle am Ende der Lebensdauer die Treibhausgas-Emissionen des Windparks um 50,03 % (von 13,15 g CO₂-Äq./kWh auf 6,57 g CO₂-Äq./kWh) senkt.

Jensen (2019) schlussfolgert in der LCA-Betrachtung eines 60 MW, dass durch Recycling aller potenziell möglichen Materialien Energie in der Höhe von 1 356 GJ/MW Anlagenleistung sowie 122,5 t CO₂-Äq./MW eingespart werden.

3.4.2 EoL-Betrachtung von Rotorblättern

Fast die gesamte in diesem Review inkludierte Literatur befasst sich zumindest teilweise mit den EoL-Optionen von Rotorblättern von Windkraftanlagen, weshalb diese in diesem Kapitel getrennt von den restlichen Windkraftkomponenten analysiert werden. In der von Diez-Cañamero & Mendoza (2023) durchgeführten LCA-Studie schneidet die Deponierung im Vergleich mit anderen EoL-Optionen besonders schlecht ab. Alternativ zur Deponierung von Turbinenblättern stehen eine Vielzahl an Strategien der CE nach Erreichung des Lebensendes von Rotorblättern zur Verfügung, darunter deren Lebensdauererweiterung, Reuse, Repurpose, Recycle und Recover, einige dieser werden nachfolgend umfassend behandelt.

Um den Abtransport demontierter Rotorblätter zu erleichtern, werden diese wenn möglich baustellenseitig zerkleinert, wobei der dabei entstehende Materialverlust sowie dessen Umweltauswirkungen nur schwer quantifizierbar sind. Cong et al. (2023) nehmen in ihrer LCA-Studie beispielsweise an, dass kein Verlust durch Zertrennen der Rotorblätter entsteht, da unzureichend relevante Daten vorhanden sind.

Lebensdauererweiterung und Reuse

Rotorblätter werden im Zuge einer Lebensdauererweiterung oft repariert, modifiziert bzw. zur Erhöhung der Anlagenleistung beim Repowering in deren Länge vergrößert. Unbeschädigte Rotor-Komponenten können problemlos wiederverwendet werden und bis zu 50 Jahre in Gebrauch bleiben (Delaney et al., 2023; Mishnaevsky, 2021; Totamaharaj & McMahon, 2021). Cao et al. (2024) haben für die Lebensdauer von 25 Jahren angenommen, dass im Zuge von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten ein Rotorblatt pro Windkraftanlage ausgetauscht werden muss (Cao et al., 2024).

Repurpose

Durch Repurposing von Rotorblättern wird der Einsatz von neuen Rohstoffen vermieden, wobei insbesondere auf potenzielle Qualitätsunterschiede zu achten ist. Daher werden in den LCA-Studien, die Repurpose betrachten, üblicherweise Referenzprodukte angeführt und Einsparungen in den Einflusskategorien hervorgehoben. Insbesondere in der Bau-Branche eignen sich Rotorblätter als tragende Elemente für Repurposing-Anwendungen zum Ersatz von Zement, Stahl bzw. Holz. Johst et al. (2023) untersuchen im Rahmen einer Umweltanalyse vier verschiedene Repurposing-Szenarien von GFK-Rotorblättern mit einer Länge von weniger als 20 m mittels LCA, diese umfassen die Verwendung in einem Kletterturm, in einem Spielplatz, als Schwimmplattform für Photovoltaikanlagen und als Liegestuhl, diese decken somit Szenarien mit hohen und niedrigen Belastungen ab. Die Rotorblätter werden für die für die Schwimmplattform und den Liegestuhl unter der Berücksichtigung der Glasfaser-Orientierung mit speziell beschichteten Werkzeugen segmentiert, wobei Sicherheits- und Gesundheitsvorkehrungen zum Schutz gegen Mikro-Glaspartikel getroffen werden sollten. Die einzelnen Repurposing-Anwendungen werden dabei jeweils mit Referenz-Anwendungen in der Lebenszyklusanalyse verglichen. So wurde beim Kletterturm, der größtenteils aus umfunktionierten Rotorblättern besteht, ein Einsparungspotenzial von 94 % berechnet und in den weiteren 5 Einflusskategorien eine Reduktion von 68–99 % im Vergleich zur Referenzanwendung zu verzeichnen. Für die Schwimmplattform errechneten sich die geringsten Einsparungspotenziale zu 69 % für das Global Warming Potential, sowie zu 22–62 % in den verbleibenden Einflusskategorien. Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass in Anwendungen, in denen die höchsten relativen Anteile durch Rotorblatt-Repurposing ersetzt werden können, auch die größten Reduktionen der Umweltauswirkungen zu erwarten sind. Wichtig ist, dass Erzeugnisse aus Rotorblatt-Recycling an deren Lebensende ebenfalls im Sinne der CE verwendet werden, um deren Deponierung zu vermeiden (Johst et al., 2023).

Nagle et al. (2022) untersuchen Repurposing-Szenarien in Irland, dabei wurden im ersten Szenario Rotorblätter in verschiedene Teile segmentiert und zu unterirdischen Wasserdurchlässen, Schächten, Brücken, Zwischenwände in Ställen bzw. für Getreide umfunktioniert. Im zweiten Szenario werden die Rotorblätter gemeinsam mit anderen

Materialien zu Bungalows weiterverarbeitet. Im dritten Szenario werden diverse Dachabdeckungen für Bushaltestellen, Plantagen, Fahrradabstellplätze sowie Pfosten oder Poller aus Rotorblättern hergestellt. Der Transport der Rotorblätter wurde berücksichtigt, deren Rückbau hingegen nicht. Haben die Stahlteile einer Sitzbank beispielsweise eine Lebensdauer von 20 Jahre und werden diese nun durch Teile von Turbinenblättern ersetzt, die weitere 60 Jahre eingesetzt werden können, so werden sogar dreimal so viele Stahlteile eingespart. Die LCA-Studie wurde nach IMPACT 2002+ durchgeführt und anhand von vier Endpoint-Einflusskategorien normalisiert, wobei die Szenarien mit der Mitverbrennung von Rotorblättern in Zementöfen verglichen wurden. Die Ergebnisse sind entgegen der Abfallhierarchie der EU, dass keines der drei Szenarien mehr Umweltvorteile liefert als die thermische Verwertung in Zementöfen, wobei Szenario 2 vor Szenario 1 die größten Vorteile liefert. Repurposing in diesen Anwendungen hat laut der vorliegenden Studie das Potential, für jede Tonne Rotorblatt-Abfall durchschnittlich 342 kg CO₂-Äq. einzusparen. Repurposing sollte versuchen, CO₂-intensive Materialien wie Stahl durch gezielten Einsatz zu ersetzen, um die besten Ergebnisse zu liefern (Nagle et al., 2022).

Eine LCA-Studie von Gennitsaris et al. (2023) kommt zu dem Ergebnis, dass das Repurposing von Rotorblättern zu einer Reduktion fossiler und nuklearer Energieverbräuche in der Größenordnung von 15 % führt (Gennitsaris et al., 2023). Der technologische Reifegrad von Rotorblatt-Repurposing ist hoch (Technologiereifegrad 8–9), wobei die Erzeugnisse oft sperrig, unflexibel im Design und nur schwer skalierbar oder großmaßstäblich verarbeitbar sind (Diez-Cañamero & Mendoza, 2023).

Recycle

In der in diesem Review inkludierten Literatur wurden eine Vielzahl an Recycling-Möglichkeiten von Rotorblättern beleuchtet, diese lassen sich grob in mechanische, chemische sowie thermische Recycling-Prozesse untergliedern. Zunächst werden die Prozesse beschrieben und anschließend die Ergebnisse aus der Literatur diskutiert, wobei die Literaturrecherche nur Literatur mit einem Technologiereifegrad von mehr als 6 berücksichtigt.

Normalerweise werden bei der Vielzahl an Variationen **mechanischer Recycling-Prozesse** die Verbundwerkstoffe zuerst mechanisch zerkleinert (geschreddert, granuliert oder gefräst) und das entstandene Rezyklat kann entweder in Fraktionen sortiert oder direkt für die Herstellung von Sekundärmaterialien verwendet werden (Pender et al., 2024). Dieses Verfahren hat eine hohe technologische Reife (Technologiereifegrad 8–9) wobei der THG-Abdruck laut Diez-Cañamero & Mendoza, (2023) groß ist. Die reduzierte Wertigkeit mechanisch recycelter Materialien ist oftmals nur mit großen Unsicherheiten zu bewerten, da es eine Mischung an Erzeugnissen liefert und die Glasfasern eine um 50 % niedrigere

Zugfestigkeit aufweisen. Weiters kann das entstandene Granulat als Zuschlagstoff in Baumaterialien eingesetzt werden (Sproul et al., 2023).

Bei den **thermischen Recycling-Prozessen** unterscheidet man die Pyrolyse, die Mikrowellen-Pyrolyse sowie thermo-oxidatives Recycling in einem Wirbelschichtreaktor (fluidised bed reactor), wobei die Pyrolyse von CFK das einzige thermische Recyclingverfahren mit einem kommerziell verfügbaren Technologiereifegrad ist. Die Polymere der Faserverbundwerkstoffe werden hiernach der Zerkleinerung bei 300–800 °C ohne oder unter Zufuhr geringer Sauerstoffmengen zersetzt, in flüchtige Bestandteile umgewandelt und dadurch von den Fasern gelöst. Die thermisch stabileren Fasern verbleiben am Ende des Prozesses, wobei die Glasfasern physikalischen Eigenschaften ähnlich den Primär-Fasern aufweisen, Karbonfasern hingegen verlieren im Schnitt 42 % ihrer Zugfestigkeit (Pillain et al., 2019). Es ist davon auszugehen, dass der Prozess mit der Zeit effizienter wird. Oftmals umfasst die Pyrolyse mehrere Stufen, wobei die Temperatur und Atmosphäre variiert werden und hitzeresistente Bestandteile entfernt werden müssen. Die durch die Verbrennung der entstehenden Gase freigesetzte Energie wird dem Prozess als Wärme rückgeführt, wobei das Harz als Rohstoff verloren geht (Diez-Cañamero & Mendoza, 2023)

Der wichtigste Vertreter der **chemischen Recycling-Prozesse** ist die Solvolyse, wobei sie aufgrund des niedrigen Technologiereifegrades von 4–5 nicht näher betrachtet wird in dieser Literaturrecherche (Diez-Cañamero & Mendoza, 2023).

Wird nur der EoL-Prozess berücksichtigt (prozessorientierte Betrachtung), so haben Recycling-Prozesse höhere Umweltauswirkungen, da sie mehr Energie als die Verbrennung oder Deponierung von Rotorblättern benötigen. Wird hingegen die dadurch bewirkte Substitution neuer Produkte und Erzeugnisse miteinbezogen (produktorientierte Betrachtung), so ist das Recycling aus Umweltsicht vorteilhaft. (Pillain et al., 2019).

Eine aktuelle LCA-Studie von Pender et al. (2024) untersucht diverse EoL-Strategien in für GFK- und Hybrid-Rotorblätter (bestehend aus Glas- und Carbonfasern) in Großbritannien, darunter Deponie, Recover, mechanische sowie chemische und thermische Recycling-Verfahren. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass mechanisches Recycling von GFK-Rotorblättern aktuell die einzige dieser Strategien ist, die zu einer Verbesserung der Umweltperformance um ca. 0,4 kg CO₂-Äq. je recyceltem kg Rotorblatt-Abfall führt. Die Herstellung von Karbonfasern ist mit 183–286 MJ/kg deutlich energieintensiver als für Glasfasern mit 45 MJ/kg (die THG-Emissionen von Karbonfasern sind sogar rund zehnmal so hoch wie Glasfasern), daher zeigt diese Studie ebenfalls, dass ein Recycling von GFK/CFK-Rotorblättern, wie sie lt. den Autoren für zukünftige Off- und Onshore-Anlagen repräsentativ sind, zu erheblichen Verbesserungen in deren Umweltperformance führen kann (Sommer et al., 2022). Pyrolyse (thermisches Recycling) führt im untersuchten Fall zu

Einsparungen der THG-Emissionen um 1,5 kg CO₂-Äq. je kg recyceltem Rotorblatt-Abfall, wobei 12,1 % bzw. 45,1 % der Gesamtmasse des betrachteten Hybrid-Rotorblattes aus Karbon- bzw. Glasfasern besteht (Pender et al., 2024).

Cao et al. (2024) beschreibt chemisches Recycling von Hybrid-Rotorblättern (bestehend aus Glas- und Carbonfasern) als die nachhaltigste der betrachteten drei EoL-Optionen (weitere sind Deponie und mechanisches Recycling), wobei im Zuge vergleichender Lebenszyklus-Analysen um 37,5 % bzw. 55,8 % mehr Gutschrift zur Emissionsreduktion entsteht als durch mechanisches Recycling bzw. Deponierung (Cao et al., 2024).

In einer LCA-Studie von Pincelli et al. (2024), die einen 176 MW Windpark umfasst, wird unter anderem das Recycling-Potenzial von Rotorblättern betrachtet. Die Lebenszyklus-Treibhausgas-Emissionen des Windparks betragen mit der Deponierung der Rotorblätter 10,8 g CO₂-Äq./kWh, werden diese hingegen mechanisch recycelt reduzieren sich die Emissionen auf 10,3 g CO₂-Äq./kWh (-4,6 %) (Pincelli et al., 2024).

Sproul et al. (2023) untersuchen in ihrer LCA-Studie verschiedene EoL-Strategien für GFK-Rotorblätter, darunter die Mitverbrennung in Zementöfen, mechanisches Recycling, Pyrolyse, Mikrowellenpyrolyse und Solvolyse, die mit der Deponierung verglichen wurden. Weiters wurde angenommen, dass alle Strategien 5–6 % des Materials durch Ineffizienzen im System verlieren. Die Ergebnisse waren hierbei, dass bei der Mitverbrennung in Zementöfen rund -0,6 kg CO₂-Äq., beim mechanischen Recycling -0,4 kg CO₂-Äq. und bei der Pyrolyse 1,1 kg CO₂-Äq. je recyceltem Kilogramm Rotorblatt-Abfall entstehen (Sproul et al., 2023).

In der LCA-Studie von Gennitsaris et al. (2023) wurde der gesamte Energiekonsum für das mechanische Schleifen bzw. die Pyrolyse von CFK mit 0,27 MJ/kg bzw. 30 MJ/kg angenommen, wobei ebenfalls berücksichtigt wurde, dass durch den Einsatz der Pyrolyse durchschnittlich 22,5 MJ/kg vermieden werden. Die genannten Werte wurden von Vo Dong et al. (2018) übernommen, wobei die konventionelle Pyrolyse für das Recycling von Rotorblättern wird in dieser LCA-Studie als ineffizient ausgewiesen wird, das liegt hauptsächlich an der Energieintensität dieses Prozesses (Gennitsaris et al., 2023; Vo Dong et al., 2018).

In einer Literatur-Recherche von Jani et al. (2022) werden die Energieverbräuche bei der Herstellung von Rotorblatt-Materialien für Karbonfaser mit 183–286 MJ/kg, für Glasfaser mit 13–32 MJ/kg, für Epoxidharz mit 76–80 MJ/kg und für Polyesterharz mit 63–78 MJ/kg angegeben. Für die Recycling-Prozesse ergeben sich 0,27–3,03 MJ/kg beim mechanischen Recycling, 3–30 MJ/kg beim thermischen Recycling (Pyrolyse und Wirbelschichtreaktor) und 63–91 MJ/kg beim chemischen Recycling (Jani et al., 2022).

Pillain et al. (2019) modellieren in ihrer LCA-Studie Recycling-Prozesse für CFK in kommerzieller Größe, darunter auch die Pyrolyse. Die Studie untersucht sowohl

prozess- (ohne Berücksichtigung der Erzeugnisse), als auch produktorientierte (unter Berücksichtigung der Erzeugnisse) LCAs und macht fundierte Annahmen zu den Prozess-Schritten sowie den In- und Output-Flüssen (z. B. Energieverbrauch oder Recycling-Materialien). Die Qualität der recycelten Karbonfasern ist in den betrachteten Szenarien sehr unterschiedlich, wodurch eine objektive Vergleichbarkeit zunehmend erschwert wird. Die hier angeführten Prozesse bieten einen ausgezeichneten Ausgangspunkt für die Entwicklung von Recycling-Szenarien (Pillain et al., 2019).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Recycling-Verfahren von Rotorblättern aufgrund der Energieverbräuche häufig höhere Umweltauswirkungen aufweisen als die Verbrennung oder Deponierung. Wird hingegen der Ersatz neuer Materialien berücksichtigt, zeigt sich Recycling aus ökologischer Sicht als effiziente Strategie.

Recover

Bei der Verbrennung von Rotorblättern werden rund 40 % der Masse für die Erzeugung von Wärme (in Zementöfen) oder zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet, die verbleibenden 60 % werden auf Deponien entsorgt oder zum Ersatz von Ton, Sandstein oder Kalkstein in der Herstellung von Zement weiterverwendet (Cong et al., 2023; Diez-Cañamero & Mendoza, 2023). Die thermische Verwertung von Rotorblättern kann die Entstehung von Rauchgas und Asche bewirken (Mello et al., 2022). Die Mitverbrennung in Zementöfen kann als alternativer Verbrennungsprozess betrachtet werden (Diez-Cañamero & Mendoza, 2023), wobei Kohlefaser-Verbundwerkstoffe nicht verwertet werden können und Glasfaser-Rückstände verbleiben. Die Mitverbrennung von GFK in Zementöfen stellt eine realistische Lösung für die nahe Zukunft dar, da sie schon heute kommerziell verfügbar (Technologiereifegrad 8–9) ist (Sproul et al., 2023).

Gegenüberstellung verschiedener EoL-Strategien

Es werden einige Publikationen betrachtet, die mehrere EoL-Strategien von Rotorblättern betrachten und somit den obigen Kategorien nicht eindeutig zuzuordnen sind.

In einer vergleichenden LCA-Studie von Cong et al. (2023) werden EoL-Strategien für GFK-Rotorblätter in China analysiert, wobei die Demontage, das Zerschneiden der Rotorblätter sowie deren Transport nicht berücksichtigt wird. Die Studie dreht sich um Treibhausgas-Einsparungen im Vergleich mit Referenzsystemen in vier Szenarien (zwei für das mechanische Recycling und zwei für die Verbrennung), diese sind in Szenario 1 der Ersatz von Braunkohle durch Rotorblätter in der thermischen Verwertung zur Elektrizitätsgewinnung, in Szenario 2 die Substitution von Braunkohle bei der Mitverbrennung in Zementöfen sowie die Nutzung der Verbrennungsschlacke zum Ersatz von Bestandteilen in der Zementherstellung, in Szenario 3 werden mechanisch recycelte Rotorblätter zum Ersatz von groben Zuschlagstoffen verwendet

und in Szenario 4 wird Zement durch GFK-Pulver ersetzt. Die CO₂-Reduktionen sind umgerechnet 74,4 g CO₂-Äq./kg Rotorblätter im ersten Szenario, 275,1 g CO₂-Äq./kg Rotorblätter im zweiten Szenario und 807,9 g CO₂-Äq./kg Rotorblätter in Szenario 4. Nur in Szenario 3 errechnet sich eine Erhöhung der Emissionen um 34,7 g CO₂-Äq./kg Rotorblätter. Szenario 4 ist somit das mit Abstand nachhaltigste in Vergleich der Studie, da aufwendig produzierter Zement ersetzt wird. In einem weiteren Schritt werden die Ergebnisse im Rahmen einer cradle-to-grave LCA-Studie auf einen 49,5 MW Windpark in China angewendet. Die Kohlenstoff-Emissionsintensität des gesamten Windparks kann durch Recycling der Metalle von 12,52 g CO₂-Äq./kWh auf 9,41 g CO₂-Äq./kWh (-24,8 %) gesenkt werden. Weiters kann die Kohlenstoff-Intensität durch Anwendung von Szenario 1 auf 9,39 g CO₂-Äq./kWh (-0,15 %), durch Szenario 2 auf 9,36 g CO₂-Äq./kWh (-0,4 %) und durch Szenario 4 auf 9,22 g CO₂-Äq./kWh (-1,5 %) reduziert werden. Durch Szenario 3 erhöht sich die Kohlenstoff-Emissionsintensität des Windparks minimal auf 9,42 g CO₂-Äq./kWh (+0,07 %) (Cong et al., 2023).

Sommer et al. (2022) nutzen die Methodik, um fortschrittliche Recycling-Technologien in Europa für GFK- und CFK-Rotorblätter wie Pyrolyse, mechanisches Recycling sowie die Mitverbrennung in Zementöfen (nur GFK) zu analysieren. Dabei werden die einzelnen EoL-Strategien systematisch in ihre Sub-Prozesse (z. B. Zerkleinern & Solvolyse) zerlegt und jeweils THG-Ausstöße für die EoL-Strategien errechnet. Die Ergebnisse sind dabei, dass bei der Verbrennung von GFK 132,35 kg CO₂-Äq./t Rotorblätter, bei der Mitverbrennung in Zementöfen von GFK 464,43 kg CO₂-Äq./t Rotorblätter, bei der Mitverarbeitung von CFK zur Herstellung von Kalziumkarbid 341,43 kg CO₂-Äq./t Rotorblätter, beim Ersatz von Epoxidharz durch klein gefräste GFK-/CFK-Rotorblätter 3 910,17 kg CO₂-Äq./t Rotorblätter und beim Ersatz von neuem GFK durch klein gefräste GFK-Rotorblätter 2 225 kg CO₂-Äq./t Rotorblätter Umweltutzen bewirkt werden (Sommer et al., 2022).

3.4.3 Details zur LCA-Methodik von Windkraftanlagen

Bei Erstellung von Lebenszyklusanalysen sollen die getroffenen Annahmen sowie die verwendeten Literaturquellen lt. ISO 14040 immer angeführt werden, dies ist insbesondere für die Bestandsanalyse (Life Cycle Inventory - LCI) von Bedeutung. Die Stücklisten für Windkraftanlagen werden häufig aus Environmental Product Declarations (EPD) extrahiert, so auch in der von Diez-Cañamero & Mendoza (2023) durchgeführten Lebenszyklusanalyse. In der Regel werden für die Bestandsanalyse unterstützend LCI-Datenbanken verwendet, wobei Ecoinvent die etablierteste ist und auch für den Großteil der von Kylili (2022) analysierten Publikationen eingesetzt wurde. In der Bestandsaufnahme ist es nur selten möglich, alle In- und Output-Ströme vollständig zu erfassen, die Unsicherheiten in den LCI-Daten setzen sich entsprechend bis in die Folgenabschätzung fort. Diese Unsicherheiten in den verwendeten Daten

sowie Annahmen und in der Modellierung sind dabei die Hauptquellen für die vorliegenden Unterschiede in den Ergebnissen der Lebenszyklusanalysen von Windkraftanlagen (Mendecka & Lombardi, 2019).

Spätestens die Demontage einer Windkraftanlage leitet deren EoL-Phase ein, einige Quellen modellieren diese in der Lebenszyklusanalyse als umgekehrten Prozess zu deren Montage (Gervásio et al., 2014).

Für jede der 23 in diesen Review inkludierten LCA-Studien wurde das Global Warming Potential als zumindest eine unter vielen Einflusskategorien verwendet, diese korreliert lt. Diez-Cañamero & Mendoza (2023) mit anderen Einflusskategorien und sie stellt somit einen der wichtigsten Indikatoren für Entscheidungen entlang der ökologischen Dimension dar (Diez-Cañamero & Mendoza, 2023).

Cut-off-Werte finden ebenfalls häufig Einsatz in Lebenszyklusanalysen, diese sind Schwellenwerte, die festlegen, welche Prozesse, Materialien und Emissionen in der Modellierung berücksichtigt werden sollen. Die Mengen an seltenen Erden (z. B. Neodym in Permanentmagneten) unterschreiten oftmals die definierten Schwellenwerte und werden daher in Lebenszyklusanalysen für Windkraftanlagen nicht berücksichtigt, obwohl sie essenzielle Rohmaterialien für WKA darstellen. Die Cut-off-Werte bestimmen, wie detailliert Aktivitäten in der Lebenszyklusanalyse modelliert werden (Kyllili, 2022). So legen Bonou et al. (2016) fest, dass alle Beiträge kleiner als 1 % zum Global Warming Potential vernachlässigt werden, Sobaszek et al. (2023) setzen diesen Wert in ihrer LCA-Studie sogar auf 0,05 % der Masseanteile eines Vestas V90 Windparks. Martínez et al. (2018) verwenden in ihren LCA-Analysen ein grob gewähltes Cut-off-Kriterium. Dabei werden 95 % der Masse des Fundaments und des Turms sowie 85 % der Masse der Gondel und des Rotors berücksichtigt.

Die Erstellung detaillierter Lebenszyklusanalysen von Windkraftanlagen ist ein zeitintensives Vorhaben, die Methodik zeichnet sich oftmals als unpraktisch ab. Deshalb kann es angemessen sein, durch den Einsatz von Annahmen und Näherungen oder durch die Harmonisierung der LCA-Ergebnisse vereinfachte LCA-Modelle zu verwenden, anstatt die Details der Prozesse zu berücksichtigen. Diese vereinfachten Modelle stützen sich auf den Ergebnissen detaillierter Lebenszyklusanalysen unter Berücksichtigung der Variabilität relevanter Parameter. Mendecka & Lombardi (2019) analysieren in ihrer Studie zunächst umfassend Lebenszyklusanalysen von Windkraftanlagen und entwickeln im Anschluss ein vereinfachtes LCA-Modell durch Harmonisierung und dem Einsatz von Regressionsanalysen unter Ermittlung etwaiger Vorteile und Limitationen. Die Anzahl der Input-Parameter konnte dabei unter Einhaltung zufriedenstellender Unsicherheiten deutlich verringert werden. Das entwickelte vereinfachte LCA-Modell eignet sich für die vorläufige Betrachtung von Umweltauswirkungen sowie für den Vergleich unterschiedlicher Technologien von Windkraftanlagen, wobei Detailanalysen damit nicht möglich sind (Mendecka & Lombardi, 2019).

3.4.4 Forschungslücke

Aus der Analyse der beschriebenen Literatur konnten die folgenden Forschungslücken identifiziert werden.

1. Ein Großteil der gefundenen Literatur befasst sich mit der LCA-Analyse ganzer Anlagen bzw. deren Rotorblätter. Kaum Publikationen umfassen dabei auf die Detailanalyse spezieller Komponenten wie Fundament, Turm, Getriebe, Generator sowie elektrischer und elektronischer Komponenten.
2. Es wurden zwar viele EoL-Strategien beschrieben, deren Detailtiefe ist insbesondere für die jeweiligen Systemkomponenten für Strategien der CE mangelhaft und die EoL-Prozesse sind meist stark vereinfacht modelliert. So wurden nur zwei relevante Publikationen für Reuse identifiziert, die sich mit dem Turm und dem Fundament (Gervásio et al., 2014) bzw. dem Getriebe (Jiang et al., 2018), nicht aber mit Rotorblättern und den weiteren Komponenten beschäftigen. Eine Quelle widmet sich mit dem Full Repowering (Martínez et al., 2018) von Windkraftanlagen. Am häufigsten wurden die Deponierung, Recover und insbesondere Recycling beschrieben (vgl. Tabelle 3.2). Für viele Komponenten von Windkraftanlagen sind die vorhandenen CE-Strategien nicht durch Lebenszyklusanalysen gestützt und Gegenüberstellungen der verschiedenen EoL-Optionen beschränken sich dabei meist nur auf wenige Strategien. Es wurde keine Publikation identifiziert, welche die CE-Strategien der Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower, Repurpose, Recycle und Recover von Windkraftanlagen in einem direkten Vergleich unter Verwendung der gleichen Methodik analysieren.
3. Die in den LCA-Studien verwendeten Input-Daten, insbesondere für die EoL-Phase, sind oft durch Annahmen modelliert oder wurden durch teilweise sehr grob gewählte Cut-off-Kriterien (Bonou et al., 2016; Martínez et al., 2018) vernachlässigt, was zu großen Unsicherheiten und Schwankungen in deren Umweltbewertung führt. Die Datenlage ist dabei auch regional stark unterschiedlich, so sind für Europa deutlich mehr Lebenszyklusanalysen vorhanden als für die USA (Alsaleh & Sattler, 2019; Sproul et al., 2023), für China (Cao et al., 2024; Cong et al., 2023; Jiang et al., 2018; Liu et al., 2021) oder dem Rest der Welt (Ozsahin et al., 2022; Pincelli et al., 2024).
4. Die Einflusskategorien umfassen zwar in allen betrachteten LCA-Studien das Global Warming Potential, vernachlässigen dabei aber meist andere Kategorien teilweise oder vollständig. Das Acidification Potential, Ozone Depletion Potential, Eutrophication Potential sowie weitere Einflusskategorien kommen deutlich seltener in den inkludierten LCA-Studien vor (vgl. Tabelle 3.2). Bereits Mello et al. (2022) weisen in ihrer Literaturanalyse darauf hin, dass die Umweltbewertungen in den untersuchten LCA-Studien oft unzureichend sind,

da diese in den Einflusskategorien häufig nur das Global Warming Potential betrachten.

5. Es wurde nur eine Quelle identifiziert, die sich mit der Vereinfachung von LCA-Analysen von Windkraftanlagen auseinandersetzt, dabei aber keinen besonderen Wert auf die Modellierung der EoL-Prozesse oder CE-Strategien legt, sondern insbesondere den verbleibenden Lebenszyklus von Windkraftanlagen betrachtet (Mendecka & Lombardi, 2019).
6. Es liegen in der inkludierten Literatur keine Lebenszyklusanalysen von Windkraftanlagen für Österreich vor.
7. Cao et al. (2024) kritisieren, dass sich trotz der zunehmenden Relevanz von CFK-Rotorblättern die vorangegangene Literatur und die LCA-Studien hauptsächlich GFK auseinandersetzen, was die in dieser Diplomarbeit durchgeführte Literaturanalyse ebenfalls bestätigt.

3.4.5 Erkennbare Trends

Zukünftig werden Windkraftanlagen auch weiterhin in ihren Dimensionen wachsen, längere Lebensdauern aufweisen und technologisch reifen, wodurch von Li et al. (2022) Reduktionen der Umwelteinflüsse in Relation zur installierten Leistung von ca. 20 % im Zeitraum von 2020 bis 2040 zu erwarten sind. Diese Prognose bezieht sich auf Offshore-Windkraftanlagen (Kylili, 2022; Li et al., 2022).

Weiters ist ein Trend von On- hin zu Offshore-Windkraftanlagen zu verzeichnen, da sie größere Rotordurchmesser und Leistungen ermöglichen. Insbesondere schwimmende Windkraftanlagen bieten hohe Potenziale für deren Industrialisierung und Skalierung. Der Einsatz von Digitalisierung, Big Data Management und maschinellem Lernen können weitere Verbesserungsmöglichkeiten für aktuelle Systeme liefern. Innovationen aus den Materialwissenschaften wie Nano-Materialien, recycelbare Rotorblatt-Werkstoffe, Beschichtungen, selbstheilende Materialien und Leichtbaustrukturen sowie deren Optimierung hin zur Kreislaufwirtschaftsfähigkeit werden ebenfalls eine zentrale Rolle in der technologischen Entwicklung zukünftiger Windkraftanlagen spielen (Kylili, 2022).

4 Verwendete Methoden

Dieses Kapitel beschreibt alle für die Erarbeitung dieser Diplomarbeit verwendeten wissenschaftlichen Methoden, um die Nachvollziehbarkeit sowie das Verständnis der LeserInnen zu verbessern. Dies sind die systematische Literaturrecherche nach Tranfield et al. (2003), Forward und Backward Reference Searching sowie die Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040 und ISO 14044. Diese Methoden werden im späteren Kapitel 5 angewandt und tragen zur Beantwortung der in Kapitel 1.2 definierten Forschungsfragen bei.

4.1 Systematische Literaturrecherche

Die systematische Literaturrecherche (SLR) nach Tranfield et al. (2003) ist eine Methode, die einen reproduzierbaren, wissenschaftlichen und transparenten Prozess verwendet, um relevante Beiträge in einem bestimmten Feld oder zur zuverlässigen und evidenzbasierten Beantwortung einer spezifischen Frage zu identifizieren. Im konkreten Fall dieser Diplomarbeit wird die SLR in einer verkürzten Variante angewandt, um eine umfassende Wissenssammlung zu generieren. Die in diesem Kapitel beschriebene Zusammenfassung beschränkt sich somit auf die für diese Diplomarbeit relevanten Inhalte. Die systematische Literaturrecherche nach Tranfield et al. (2003) umfasst drei Stufen:

Stufe I - Planung des Reviews

Stufe II - Durchführung des Reviews

Stufe III - Berichterstattung und Dissemination

Stufe I - Planung des Reviews

Die erste Stufe der systematischen Literaturrecherche befasst sich mit der Planung des Reviews, hierbei können Expert_innen des jeweiligen Feldes und der Methodik miteinbezogen werden. Die Abschätzung der Relevanz und Größe der vorliegenden Literatur ist ein zentraler Bestandteil der Planung (Tranfield et al., 2003).

Ein weiterer wichtiger Ausgangspunkt der SLR ist die Definition der Review-Fragen, die die Recherche beantworten soll. Es wird ein Review-Protokoll erstellt, das die Review-Fragen, den Fokus, die Suchstrategie sowie Ein- und Ausschlusskriterien des Reviews umfasst. Das Ziel ist es hierbei die Objektivität zu bewahren, ohne die Kreativität der jeweiligen Reviewer einzuschränken.

Stufe II - Durchführung des Reviews

Die Durchführung des Reviews beginnt mit der Identifikation von Keywords und Suchbegriffen zur Beantwortung der Review-Fragen, woraufhin der Reviewer eine Suchstrategie entwickelt. Diese muss ausreichend detailliert beschrieben sein, um die

Suche zu reproduzieren. Die Ergebnisse der Suchanfrage werden in eine vollständige Liste überführt und sollen sich dabei nicht nur auf veröffentlichte Zeitschriften und bibliografische Datenbanken beschränken, sondern nach Möglichkeit auch unveröffentlichte Studien, Konferenzberichte, Industrieversuche, das Internet und sogar persönliche Anfragen bei relevanten Spezialisten umfassen. All jene Artikel und Publikationen, die nach Berücksichtigung der Ein- und Ausschlusskriterien des Review-Protokolls verbleiben, werden im Review berücksichtigt. Die im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit durchgeführte Literaturrecherche (vgl. Kapitel 3) wurde unter der Verwendung der Scopus-Datenbank für wissenschaftliche Literatur umgesetzt (Tranfield et al., 2003).

Nun führt der Reviewer eine Überprüfung aller potenziell relevanter Zitate der verbleibenden Literatur durch und wählt relevante Quellen für eine detaillierte Auswertung des Volltextes aus. Dieser Schritt erfolgt oft in mehreren Stufen, wobei die Gründe für Ausschlüsse dokumentiert und die Anzahl einbehaltener Quellen angeführt werden. Studien, die den allgemeinen Standards hinsichtlich unabhängiger und abhängiger Variablen entsprechen, sollten vermieden werden, um auf eine Qualitätsbewertung zu verzichten. (Tranfield et al., 2003).

Mit der Auswertung der Volltexte beginnt die Datenextraktion aus den ausgewählten Quellen, die eine Dokumentation aller durchgeführten Schritte erfordert. Um menschlichen Bias und Fehler bestmöglich einzudämmen, können dabei Datenextraktionsformulare in der SLR genutzt werden. Diese sollten zumindest einige Einzelheiten zur Informationsquelle (Titel, Autoren, Zeitschrift, Publikationsinformationen) sowie Details, Kontext und Methoden der Quellen beinhalten, sind aber ansonsten flexibel an die jeweilige SLR anpassbar. Datenextraktionsformulare umfassen Hinweise auf weitere Konzepte, wichtige Resultate und weitere relevante Anmerkungen (Tranfield et al., 2003).

In der Forschungssynthese werden die Ergebnisse der untersuchten Literatur zusammengefasst, integriert und kumuliert. Dafür gibt es je nach Natur und Tiefe der SLR verschiedene Analyse- und Synthese-Methoden. In vorliegenden Fall dieser Diplomarbeit genügt ein Überblick der inkludierten wissenschaftlichen Literatur (Tranfield et al., 2003).

Stufe III - Berichterstattung und Dissemination

Das Ziel einer SLR ist es, das Verständnis der Forschung für Praktizierende durch die Synthese vorangegangener wissenschaftlicher Publikationen zu vertiefen. Die Berichterstattung kann dabei aus zwei Stufen bestehen, wobei die erste eine deskriptive Analyse der Publikationen wie beispielsweise eine Beschreibung der Autoren, regionale und demografische Verteilung, weitere Untergliederung der in Kategorien oder Ähnliches umfasst. Im zweiten Teil des Berichtes können die thematischen Resultate angeführt werden, wobei klar hervorgehen muss, ob diese aus

der Sammlung oder Interpretation der vorliegenden Literatur stammen. Es können Gemeinsamkeiten, Unterschiede, weitere Kernthemen oder Forschungsfragen hervorgehoben werden. Praktizierende sollten trotz der weitreichenden Informationen einen kritischen Blick beibehalten und die eigene Problemlösungskompetenz nutzen (Tranfield et al., 2003).

4.2 Forward und Backward Reference Searching

Neben der Keyword-Suche der SLR kommt in dieser Diplomarbeit auch das Forward und Backward Referenz Searching zum Einsatz, um durch eine diversifizierte Suchstrategie weitere relevante Literatur zu identifizieren. Laut Levy und Ellis (2006) ist es ein häufiger Fehler zu glauben, dass eine Keyword-Suche vollständig ist. Im Unterschied zur SLR basiert diese Methode auf menschlich erstellten Indizes und verfolgt das Ziel, die Literatursuche nicht vorrangig auf den Annahmen der Bearbeiter_innen über Relevanz aufzubauen, sondern vielmehr der Literatur selbst zu überlassen, aufzuzeigen, welche Studien von Bedeutung sind (Levy & Ellis, 2006).

Hinde und Spackman (2015) definieren die Methode Bidirectional Citation Searching to Completion (BCSC), die auch hier Anwendung findet und beschrieben wird. Zuerst wird ein Pool bestehend aus Kernliteratur erstellt, diese kann aus vorangegangenen systematischen oder unsystematischen Suchen sowie aus einem Kenntnis der Literatur stammen. Durch die Sammlung der darin vorgefundenen Referenzen (Backward) und Zitationen (Forward) entsteht ein weiterer Pool aus Literatur. Aus diesem werden irrelevante Publikationen (erneute Verwendung der Ausschlusskriterien) ausgeschlossen und im Anschluss die Referenzen und Zitationen der neuen Literatur überprüft. Dieser Prozess wiederholt sich, bis alle relevanten Publikationen in diesem Kreislauf identifiziert wurden oder bis zur Erreichung des Abbruchkriteriums, also nach einer vordefinierten Anzahl an Wiederholungen (Levy & Ellis, 2006).

4.3 Lebenszyklusanalyse

Die Lebenszyklusanalyse (LCA – Life Cycle Assessment) nach ISO 14040 (ISO, 2006a) und ISO 14044 (ISO, 2006b) ist eine wichtige Methode, um Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen zu quantifizieren (Caiardi et al., 2023). Die Darstellung der Umweltauswirkungen untergliedert sich dabei in die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus, diese umfassen die Rohstoffgewinnung, Produktion, Distribution, Nutzung und das EoL-Management. Entscheidungsprozesse zentraler gesellschaftlicher Akteur_innen wie Regierungen, nicht-staatliche Organisationen und die Industrie sollen durch die wissenschaftsbasierten Strukturen der Lebenszyklusanalyse unterstützt werden. In der ISO 14040 (ISO, 2006a) werden ferner weitere Anwendungsfelder hervorgehoben, in welchen Lebenszyklusanalysen von Nutzen sein können, darunter die Verbesserung der Umweltperformance von

Produkten in verschiedenen Abschnitten ihres Lebenszyklus, die Selektion relevanter Umwelt-Indikatoren sowie für Marketingzwecke (z. B. für Umweltzertifikate). Diese Diplomarbeit befasst sich mit den Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien von Windkraftanlagen, wofür sich die Anwendung der Lebenszyklusanalyse ausgezeichnet eignet (ISO, 2006a; Owsianiak et al., 2018).

4.3.1 Die Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040 & ISO 14044

Für die Lebenszyklusanalyse sind zwei Standards von besonderer Relevanz, in der ISO 14040 (ISO, 2006a) sind das Rahmenwerk sowie die Prinzipien beschrieben und in der ISO 14044 (ISO, 2006b) die Anforderungen und Leitlinien. Beide Normenwerke sind Teil der ISO 14000 Serie, die Umweltmanagement für Unternehmen und Organisationen standardisiert (ISO, 2015). Zunächst werden die wichtigsten Definitionen der ISO 14040 (ISO, 2006a) und ISO 14044 (ISO, 2006b) aus den englischsprachigen Originaldokumenten ins Deutsche übersetzt (mit DeepL durchgeführt) und nachfolgend angeführt:

Lebenszyklus: *Aufeinanderfolgende und miteinander verknüpfte Phasen, von der Rohstoffbeschaffung oder -erzeugung aus natürlichen Ressourcen bis zur endgültigen Entsorgung.*

Lebenszyklusanalyse: *Zusammenstellung und Bewertung der Inputs, Outputs und der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems während seines gesamten Lebenszyklus.*

Lebenszyklus-Bestandsanalyse (life cycle inventory analysis – LCI): *Phase der Ökobilanz, die die Zusammenstellung und Quantifizierung der Inputs und Outputs eines Produkts während seines gesamten Lebenszyklus umfasst.*

Lebenszyklus-Folgenabschätzung (life cycle impact assessment - LCIA): *Phase der Ökobilanz, die darauf abzielt, das Ausmaß und die Bedeutung der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems während des gesamten Lebenszyklus des Produkts zu verstehen und zu bewerten.*

Abschneide-Kriterien (Cut-off-criteria): *Festlegung der Menge an Material- oder Energieströmen oder des Grades der Umweltsignifikanz im Zusammenhang mit Prozess- oder Produkteinheiten, die von einer Studie ausgeschlossen werden sollen.*

Elementarfluss (elementary flow): Stoff oder Energie, der/die in das untersuchte System gelangt und der Umwelt entnommen wurde, ohne dass er/sie zuvor vom Menschen umgewandelt wurde, oder Stoff oder Energie, der/die das untersuchte System verlässt und ohne nachfolgende Umwandlung durch den Menschen in die Umwelt abgegeben wird.

Funktionelle Einheit²: Quantifizierte Leistung eines Produktsystems zur Verwendung als Bezugseinheit.

Produktsystem (product system): Sammlung von Prozesseinheiten mit Elementar- und Produktflüssen, die eine oder mehrere definierte Funktionen ausführen und den Lebenszyklus eines Produkts modellieren.

Einheitsprozess (unit process): kleinstes in der Sachbilanz berücksichtigtes Element, für das Input- und Outputdaten quantifiziert werden.

Systemgrenze (system boundary): Grenze auf der Grundlage einer Reihe von Kriterien, die angeben, welche Einheitsprozesse Teil des untersuchten Systems sind.

Einflusskategorie (impact category): Klasse, die für die Umweltprobleme steht, denen die Ergebnisse der Sachbilanz zugeordnet werden können.

In der Lebenszyklusanalyse werden verschiedene Einflusskategorien von Produkten anhand deren einzelner Phasen des Lebenszyklus quantitativ ausgewiesen. So kann beispielsweise die Wirkungskategorie Klimawandel (GWP - Global Warming Potential) durch das Erderwärmungspotenzial, also der Menge an ausgestoßenen Treibhausgasen (in kg CO₂-Äq.) je funktionaler Einheit, für jede der fünf Phasen des Lebenszyklus beschrieben werden. Dadurch ist klar ersichtlich, welche Prozesse im Produktsystem wie große Umweltauswirkungen verursachen. Maßnahmen wie das Recycling eines Materials in der EoL-Phase können dabei in der LCA einen Umweltnutzen liefern und dadurch den Gesamtabdruck eines Produktes senken. In der vorliegenden Diplomarbeit werden die Einflusskategorien zur Steigerung der

² Die Funktionelle Einheit in der ISO 14040 ist eine quantitative Beschreibung der Funktion oder Dienstleistung, für welche die Bewertung durchgeführt wird, und dient im Zuge der LCA als Referenzmaßstab und Grundlage für den Vergleich verschiedener Produkte oder Systeme. Sie definiert, was in der LCA untersucht wird (Hauschild, 2018; ISO, 2006a).

Konsistenz mit der verwendeten Literatur in englischer Sprache verwendet (ISO, 2006b).

Laut der ISO 14040 (2006a) besteht eine Lebenszyklusanalyse im Allgemeinen aus den folgenden vier Phasen:

1. Der Ziel- und Umfangsdefinition,
2. der Bestandsanalyse (LCI – Life Cycle Inventory),
3. der Folgenabschätzung (LCIA – Life Cycle Impact Assessment) und
4. der Interpretation.

Diese Phasen und deren Zusammenhänge sowie wichtige Anwendungen der Lebenszyklusanalyse sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Je nach Zieldefinition kann es auch ausreichend sein, nur die Phasen der Bestandsanalyse (LCI) und der Interpretation durchzuführen, so werden in der Norm LCI- und LCA-Studien unterschieden. Die beiden sind ähnlich, wobei LCI-Studien auf die LCIA-Phase verzichten. Weder LCI- noch LCA-Studien berücksichtigen ökonomische oder soziale Aspekte von Produkten (ISO, 2006a).

Zu Beginn wird das Ziel der LCA definiert. Warum wird die Studie durchgeführt und welche Fragen sollen dabei beantwortet werden? Die Zieldefinition steckt den Rahmen der Analyse und ist notwendig für die Umfangsdefinition, in der

- eine Funktionale Einheit definiert wird,
- die zu berücksichtigenden Aktivitäten bestimmt werden,
- Bewertungsparameter (Auswirkungen, die betrachtet werden sollen) festgelegt werden,
- geografische und zeitliche Grenzen gewählt werden, die für Prozesse im Produktsystem relevant sind,
- die Perspektive³ der Studie gewählt wird,
- festgestellt wird, ob eine kritische Prüfung notwendig ist (Hauschild, 2018; ISO, 2006b).

In der Bestandsanalyse (LCI) werden Informationen über alle Ressourcen-, Material, Halbzeug- oder Produkteinputs und Outputs wie Emissionen, Abfälle und Produkten mit Restwert gesammelt und anhand der funktionalen Einheit skaliert. Aufgrund des Umfangs und der notwendigen Datenmengen vieler Prozesse kommen hier häufig Datenbanken (vgl. Kapitel 4.3.2) zum Einsatz. Diese werden für übliche In- und Output-Flüsse für die Herstellung von Materialien, die Energieerzeugung, den

³ Für die Perspektive der LCA stehen dabei zwei Möglichkeiten zur Auswahl. Einerseits kann es sich um eine Folgestudie handeln, welche die Auswirkungen als Folge der Wahl einer Alternative gegenüber einer anderen beschreibt. Andererseits um eine Attributiv-Studie, die die Auswirkungen der untersuchten Tätigkeit bewertet. (Hauschild, 2018; ISO, 2006a).

Transport oder die Abfallentsorgung verwendet. Das Ergebnis ist eine Liste quantifizierter Elementarflüsse des Produktsystems in der Darstellung der funktionalen Einheit (Hauschild, 2018; ISO, 2006b).

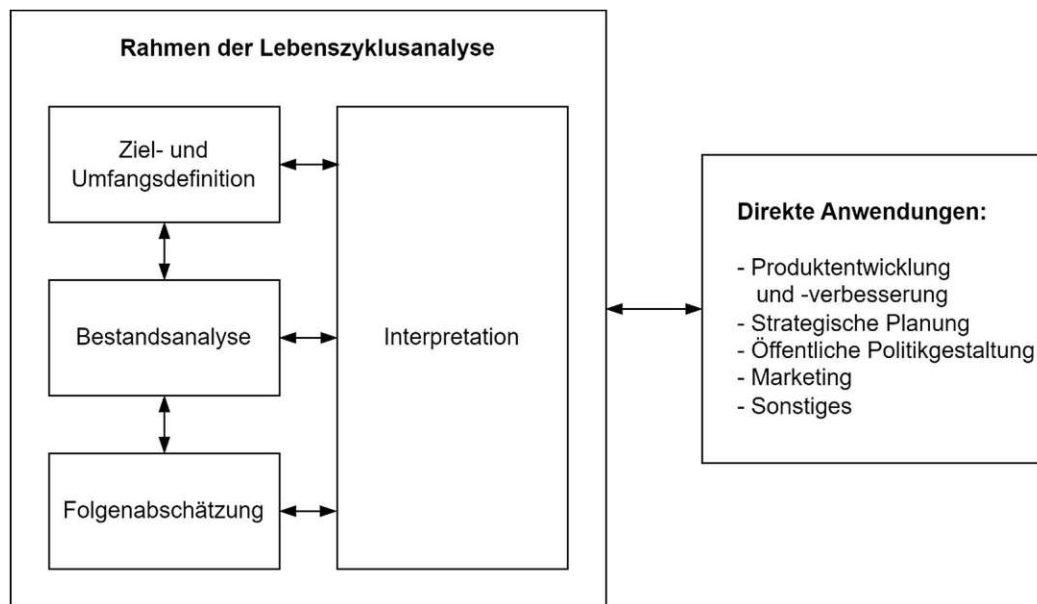


Abbildung 4.1: Phasen der Lebenszyklusanalyse laut ISO 14040 (ISO, 2006a)

Für jedes definierte Szenario wurden alle relevanten Prozessschritte und Materialflüsse identifiziert (z. B. Demontage, Transporte, Recyclingprozesse). Diese wurden entsprechenden Datensätzen der Ecoinvent-Datenbank zugeordnet, um konsistente Lebenszyklus-Modelle zu erhalten. Aus Primärdaten und Literaturwerten (Anhang 7.2–7.6) wurden die nötigen Inputgrößen berechnet und in einer Sachbilanz (LCI) zusammengestellt. Dieses LCI bildet die Grundlage für die anschließende Folgenabschätzung.

Laut Hauschild (2018) werden bei der Folgenabschätzung die in der Bestandsanalyse gesammelten Informationen in Umweltauswirkungen übersetzt, diese umfasst laut ISO 14040 (ISO, 2006a) die folgenden fünf Elemente, wobei die ersten drei verpflichtend sind:

1. Die Wahl von Einflusskategorien (z. B. Global Warming Potential), die repräsentativ für die in der Umfangsdefinition gewählten Bewertungsparameter sind.
2. Die Klassifizierung der Elementarflüsse aus der Bestandsanalyse durch Zuordnung zu den Wirkungskategorien, entsprechend dem Potential der Elementarflüsse der jeweiligen Wirkungskategorie beizutragen.
3. Die Nutzung von Umweltmodellen (Berechnungsmodelle, vgl. nächste Seite), um zu quantifizieren, wie stark die Elementarflüsse die jeweiligen Wirkungskategorien beeinflussen. Dadurch kann im Weiteren eine Gesamtpunktzahl der entsprechenden Wirkungskategorie für das Produktsystem aufsummiert werden. Das Gesamtbild der Umweltauswirkungen

- eines Produktsystems wird anhand der Gesamtpunktezahlen der verschiedenen Wirkungskategorien in den jeweiligen Metriken dargestellt.
4. Durch die Normalisierung wird die relative Größe der Gesamtpunktezahlen in den verschiedenen Wirkungskategorien veranschaulicht und anhand einer Referenz-Umweltauswirkung für jede Wirkungskategorie dargestellt. Das Ergebnis ist das normalisierte Wirkungsprofil des Produktsystems, in dem alle Umweltauswirkungen mit derselben Metrik beschrieben sind.
 5. Das Gruppieren und Gewichten nach wahrgenommener Schwere hilft beim Vergleich der einzelnen Wirkungskategorien untereinander und lässt in einem weiteren Schritt die Ableitung und Reduktion auf eine einzige Gesamtpunktzahl für das gesamte Produktsystem zu. Dies ist insbesondere von Interesse, wenn weitere Metriken (z. B. ökonomische) betrachtet werden müssen (Hauschild, 2018; ISO, 2006b).

In der vorliegenden Diplomarbeit entfällt Schritt 5, da er keinen Mehrwert für die gewählte Betrachtungsweise liefert, die Durchführung des LCIA der EoL-Strategien wird in Kapitel 5.4 behandelt. Abschließend kommt es zur Interpretation der Ergebnisse der Analyse im Zusammenhang mit der Ziel- und Umfangsdefinition und den dort gestellten Fragen. Es werden sowohl Resultate der Bestandsanalyse als auch der Folgenabschätzung diskutiert (Hauschild, 2018; ISO, 2006b). Die Durchführung von Sensitivitätsanalysen ist entsprechend der ISO 14040 (2006) empfohlen, da sie die Robustheit der Ergebnisse und Schlussfolgerungen bestärkt. Ziel ist es, jene Parameter zu identifizieren, die die Ergebnisse der Ökobilanzierung am stärksten beeinflussen, diese zu verändern und die daraus resultierenden Veränderungen in den Ergebnissen zu beschreiben (Rosenbaum et al., 2018).

Der Verlauf einer Lebenszyklusanalyse ist jedoch keineswegs linear, sondern vielmehr als iterativer Prozess zu sehen, dessen Iterationsschleifen immer kleiner werden. Jede Phase der Lebenszyklusanalyse produziert Feedback für vorangegangene Phasen, die Doppelpfeile in Abbildung 4.1 zeigen genau diese gegenseitige Beeinflussung. Erkenntnisse aus der Folgeabschätzung werden verwendet, um die Bestandsanalyse zu verfeinern und Einsichten aus diesen beiden Phasen können wiederum Änderungen in der Umfangsdefinition bewirken. Die Empfindlichkeits- und Unsicherheitsanalyse kommen nicht nur zum Schluss, sondern bereits während der Bestandsanalyse und Folgenabschätzung zum Einsatz (Hauschild, 2018; ISO, 2006a).

Im Betrachtungsrahmen von Lebenszyklusanalysen nach ISO 14040 (ISO, 2006a) und ISO 14044 (ISO, 2006b) werden wie erwähnt Systemgrenzen definiert, die berücksichtigte Prozesse ein- bzw. ausschließen. Diese Grenzen sowie getroffene Entscheidungen und Annahmen müssen aus der Durchführung einer LCA nachvollziehbar hervorgehen, da sie Einfluss auf die Ergebnisse haben (ISO, 2006a). In der vorliegenden Diplomarbeit wird die EoL-Phase von Windkraftanlagen betrachtet, diese beginnt mit dem Ende der vorhergesehenen Betriebsdauer der Vestas V90 von

20 Jahren (Garrett & Rønde, 2011) Windkraftanlage und variiert mit der jeweilig betrachteten EoL-Strategie. Diesen Betrachtungsrahmen bezeichnet man in der wissenschaftlichen Literatur oft als gate-to-gate (von Tor-zu-Tor), da nur ein Ausschnitt des gesamten Produktlebenszyklus berücksichtigt wird. In cradle-to-grave (von Wiege-zu-Grab) Lebenszyklusanalysen (der häufigsten Form von LCA) hingegen wird der ganze Produktlebenszyklus inklusive Lieferketten berücksichtigt. Weiters kann die Systemgrenze cradle-to-gate (von Wiege-zu-Tor) definiert werden (EK - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010).

Die ISO 14040 (ISO, 2006a) und die ISO 14044 (ISO, 2006b) standardisieren zwar Lebenszyklusanalysen, spezifizieren dabei aber keine bestimmte Berechnungsmethode für die Folgenabschätzung (LCIA – Life Cycle Impact Assessment), weshalb eine Vielzahl an LCIA-Methoden entwickelt wurden, die sich in den Ergebnissen von Lebenszyklusanalysen stark voneinander unterscheiden können. Verschiedene Methoden berechnen unterschiedliche Umweltauswirkungen aus den in der Bestandsaufnahme (LCI – Life Cycle Inventory) gesammelten Daten. Aus einem Bericht des Deutschen Umweltbundesamtes (2021) werden Empfehlungen für die Ökobilanzierung von Windkraftanlagen erarbeitet, dieser empfiehlt dabei die Verwendung der CML-Methodik, da diese für den europäischen Kontext entwickelt wurde, weit verbreitet und wissenschaftlich anerkannt ist. Weiters wurden in diesem Bericht die für die Windkraft wichtigsten Einflusskategorien beschrieben, diese sind das Global Warming Potential (GWP), das Acidification Potential (AP), das Eutrophication Potential (EP) und das Photochemical Ozone Creation Potential (POF). Die genannten Einflusskategorien werden daher auch in der vorliegenden Diplomarbeit verwendet (Deutsches Umweltbundesamt, 2021).

4.3.2 Software und Datenbanken in der Lebenszyklusanalyse

Die Bestandsanalyse (LCI) der Lebenszyklusanalyse ist besonders wichtig, aber zeitintensiv, da die Sammlung zuverlässiger Daten zu den Elementar-, Produkt- und Abfallflüssen oftmals schwierig ist. Typischerweise umfassen LCA Tausende von Einheitsprozessen, die Automatisierung der einzelnen Schritte kann dabei helfen, diese großen Datenmengen zu verarbeiten, dabei den Überblick zu behalten und die Prozesse entlang des Produktlebenszyklus möglichst realitätsnahe abzubilden (Köck et al., 2023).

Oftmals unterscheiden die Ersteller der LCA Vordergrund- und Hintergrundsysteme. Vordergrundsysteme bestehen aus Prozessen, die vom Auftraggeber der Lebenszyklusanalyse beeinfluss- und kontrollierbar und somit auch für den Ersteller klar beobachtbar sind. Hintergrundsysteme sind meist nicht oder nur indirekt vom Auftraggeber der LCA beeinflussbar und die Möglichkeiten der Datenbeschaffung kann variieren. Vordergrundsysteme können also durch die gezielte Sammlung von Daten berücksichtigt werden, Hintergrundsysteme werden hingegen meist durch die

Verwendung generischer Daten aus LCI-Datenbanken, öffentlichen und offiziellen nationalen Statistiken, Unternehmens-Webseiten oder wissenschaftlichen Publikationen modelliert. Nur in seltenen Fällen übersteigt das Vordergrundsystem 5 % der Einheitsprozesse der Bestandsanalyse, eine Automatisierung kann aber sowohl für Vorder- als auch für Hintergrundsysteme genutzt werden. In der vorliegenden Diplomarbeit musste ausschließlich mit Hintergrund-Daten modelliert werden, da detaillierte Prozesse wie die Herstellung von Ersatzteilen sowie die damit zusammenhängenden Lieferketten nicht öffentlich zugänglich sind und dies außerhalb des Betrachtungsrahmens dieser Diplomarbeit liegt (Köck et al., 2023).

Für die Unterstützung in der Bestandsanalyse (LCI) werden eine Vielzahl an Softwarelösungen angeboten, darunter beispielsweise GaBi, SimaPro, openLCA, Umberto und Quantis Suite. Viele kommerziell verfügbare Softwarepakete wie GaBi und SimaPro haben vorinstallierte Datenbanken, wohingegen die Nutzer_innen bei kostenlosen Softwareprogrammen wie Brightway und CMLCA selbst für Hochladen dieser Daten verantwortlich bleiben. Die Ergebnisse von Lebenszyklusanalysen unterschieden sich dabei bei der Verwendung verschiedener Software und Datenbanken in allen von Xicotencatl et al. (2023) untersuchten Publikationen. Von Datenbanken wird eine möglichst zuverlässige und realitätsnahe Abbildung der genutzten Technologien und Prozesse erwartet. Die ecoinvent Datenbank gilt dabei als die am weitesten verbreitetste unter LCA-Praktizierenden, sie wurde unter Verwendung europäischer Industriedaten erstellt (Gennitsaris et al., 2023; Xicotencatl et al., 2023).

Ecoinvent unterscheidet dabei grundsätzlich vier verschiedene Systemmodelle, die jeweils unterschiedliche methodische Regeln und Annahmen für Lebenszyklusanalysen anwenden, insbesondere im Umgang mit Nebenprodukten, Abfällen und Recycling:

- Allocation, Cut-off by classification (Cut-off-Modell),
- Allocation, Cut-off, EN15804,
- Allocation at the point of substitution (APOS) und
- Substitution, consequential, long-term (Konsequenzielles Modell).

Das Cut-off-Modell wird aufgrund seiner einfachen Verständlichkeit sowie der Kontinuität zu früheren Datenbankmodellen als Standardmodell empfohlen. Die Umweltlasten der Primärproduktion werden hierbei immer dem Primärverbraucher zugeordnet, der Primärproduzent erhält für die Bereitstellung Recyclingmaterialien keine Gutschrift. Die Bezeichnung „Cut-off“ leitet sich aus dieser methodischen Abgrenzung ab. Das Systemmodell Allocation, Cut-off, EN15804 wurde speziell für die Erstellung von Environmental Product Declarations entwickelt und für diese Diplomarbeit nicht relevant. Im Systemmodell ‚Allocation at the point of substitution

(APOS) wird die Verantwortung für Abfälle (Belastungen) zwischen Primärproduzenten und Primärverbrauchern geteilt. Von einem Behandlungsprozess (z. B. Recycling) profitieren beide, da die entstehenden Produkte beiden zukommen. Die Anwendung dieses Modells würde in dieser Diplomarbeit bedeuten, dass für jeden Recyclingstrom die jeweilige Allokationsregel überprüft werden müsste, was den Aufwand der Lebenszyklusanalyse erhöht, ohne einen inhaltlichen Mehrwert zu schaffen. Das Folge-Modell (Substitution, consequential, long-term) adressiert vor allem marktdynamische „Was-wäre-wenn“-Fragestellungen, etwa zu Auswirkungen politischer Maßnahmen, Marktreaktionen oder globaler Stoffströme. Solche Analysen liegen außerhalb des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit (ecoinvent Association, 2024).

Deswegen wird die ecoinvent v3.11 Cut-off (Allocation, Cut-off by classification) Datenbank (aktuelle Version) in der vorliegenden Diplomarbeit für die Modellierung der Prozessdaten im LCI verwendet. Für die Umsetzung der LCI-Daten in LCIA-Ergebnisse wurde ActivityBrowser gewählt, da dieser Open-Source ist, eine einfache Integration verschiedener ecoinvent-Systemmodelle erlaubt und nicht weniger zuverlässig und anerkannt ist wie kostenpflichtige Lösungen. Es handelt sich dabei um ein User-Interface für das Python-basierte Tool Brightway, das hingegen keine Programmier-Kenntnisse voraussetzt (Gómez-Navarro et al., 2024; Steubing et al., 2020).

5 Umsetzung / Implementierung

Nun werden zur Beantwortung der offengebliebenen Forschungsfragen die in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen, die in Kapitel 3 durchgeführte Literaturanalyse sowie die in Kapitel 4.3 erklärte Methode der Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040 (ISO, 2006a) und ISO 14044 (ISO, 2006b) eingesetzt. Einige methodische Entscheidungen mit Relevanz für Kapitel 5 wurden zur Steigerung der Lesbarkeit bereits in Kapitel 4.3 getroffen. Kapitel

Das Vorgehen sowie die weitere Gliederung der folgenden Kapitel wurden größtenteils aus dem Aufbau von Lebenszyklusanalysen nach ISO 14040 (ISO, 2006a) und ISO 14044 (ISO, 2006b) übernommen. Dementsprechend werden in Kapitel 5.1 die Ziele beschrieben, betrachtete Szenarien definiert und weitere methodische Annahmen und Entscheidungen angeführt. In Kapitel 5.2 wird die allgemeine Datengrundlage für das LCI aufbereitet, indem eine Materialliste der Vestas V90 für die Systemkomponenten Fundament, Turm, Gondel und Rotor erstellt und ein Anlagenstandort festgelegt wird. Kapitel 5.3 widmet sich der Erstellung des LCI, Kapitel 5.4 dem LCIA, deren Ergebnisse sowie der Sensitivitätsanalyse wichtiger Systemparameter. Die Entwicklung eines Vorschlags zur Simplifizierung der Lebenszyklusanalysen wird in Kapitel 5.5 erarbeitet.

5.1 Zielsetzung & Szenarien der Lebenszyklusanalysen

Das Ziel der nachfolgenden Lebenszyklusanalysen ist einerseits eine möglichst umfassende ökologische Bewertung und der Vergleich verschiedener EoL-Strategien der CE auf der Betrachtungsebene von Systemkomponenten am Beispiel einer Vestas V90. Daraus werden Gemeinsamkeiten der unterschiedlichen EoL-Strategien sowie ein Vorschlag zur Simplifizierung von Windkraftanlagen erarbeitet. Die Verwendung dieser kann den Aufwand in der Ökobilanzierung von zirkulären EoL-Strategien in der Windkraft verringern. Weiters werden Anforderungen an eine solche Bewertungsmethode definiert, sodass sich diese auf weitere Windenergieanlagen übertragen lässt. Eine Sensitivitätsanalyse soll im Zuge des LCIA in Kapitel 5.4 zeigen, wie sich eine Variation zentraler Parameter auf die Ergebnisse auswirkt. Anschließend wird eine simplifizierte LCA-Methode abgeleitet, mit dem Ziel der Reduktion der Inputparameter. Die Methode wird anschließend validiert.

Die Systemkomponenten von Windkraftanlagen umfassen das Fundament, den Turm, die Gondel sowie den dreiblättrigen Rotor. Die in Kapitel 2.2.4 und Kapitel 3.4 identifizierten EoL-Strategien enthalten die Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower, Repurpose, Recycle und Recover. Für eine Beschreibung dieser wird auf den Grundlagenteil in Kapitel 2.2.4 verwiesen. Es wird zwischen EoL-Strategien zur Verlängerung der Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse und Repower), also

einem weiteren Betrieb von Windenergieanlagen und den Strategien der Materialverwertung (Repurpose, Recycle und Recover), also der Demontage von Windkraftanlagen und der anschließenden Behandlung mit den eingesetzten Materialien unterschieden. Jede Strategie der verlängerten Lebensdauer kann beliebig mit jeder Strategie der Materialverwertung gepaart werden und gemeinsam zur Anwendung kommen, so kann beispielsweise ein wiederverwendeter Rotor zu einem späteren Zeitpunkt zusätzlich recycelt werden. Nicht alle EoL-Strategien und Systemkomponenten einer Windkraftanlage lassen sich dabei, wie in Tabelle 2.2 ersichtlich (vgl. Kapitel 2.2.4), beliebig kombinieren. Es wurden ausschließlich Szenarien mit einem ausreichenden kommerziell nutzbaren technologischen Reifegrad von 8–9 definiert und erarbeitet, da nur diese aus heutiger Sicht großmaßstäblich angewandt werden können. Es ergeben sich die in Tabelle 5.1 dargestellten Szenarien, wobei eine Nomenklatur anhand der EoL-Strategien (Zahl vor dem Punkt) und der Systemkomponenten (Zahl nach dem Punkt) festgelegt wurde. In der nachfolgenden Erarbeitung dieser Szenarien kann es vorkommen, dass mehrere Optionen innerhalb eines Szenarios technisch möglich sind. Beispielsweise stehen beim Recycling des Rotors (Szenario 5.4) mehrere Verfahren zur Auswahl. Hier werden anhand der wissenschaftlichen Literatur die aus Umweltperspektive effizientesten Methoden der jeweiligen EoL-Strategie für das entsprechende Material modelliert und wenn zutreffend dokumentiert (vgl. Kapitel 5.3).

Tabelle 5.1: Durch Kombinationen aus Komponenten und Strategien definierte EoL-Szenarien der V90

EoL-Strategie		Verlängerte Lebensdauer			Materialverwertung		
		Lebensdauer- erweiterung	Reuse	Repower	Repurpose	Recycle	Recover
Systemkomponente	Nr.	1.x	2.x	3.x	4.x	5.x	6.x
Fundament	y.1	1.1		3.1		5.1	
Turm	y.2	1.2	2.2	3.2		5.2	
Gondel	y.3	1.3	2.3	3.3		5.3	
Rotor	y.4	1.4	2.4	3.4	4.4	5.4	6.4

Die meisten bestehenden LCA-Studien beschränken sich entweder auf einzelne EoL-Optionen oder auf spezifische Komponenten (häufig Rotorblätter). Im Unterschied zu diesen werden in der vorliegenden Arbeit erstmals alle wesentlichen zirkulären EoL-Strategien einer Windkraftanlage unter identischen Rahmenbedingungen einander gegenübergestellt. Dabei wählen wir bewusst eine andere funktionelle Einheit als die meisten LCA-Studien in der Windkraft (vgl. Kapitel 3.4) – nämlich eine komplette Systemkomponente der Vestas V90-2MW Windkraftanlage (Fundament, Turm, Gondel oder Rotor) statt einer Energie- oder Leistungseinheit. Damit lassen sich die Umweltauswirkungen komponentenbezogen und differenziert vergleichen (eine Aufteilung der Anlagenleistung auf Einzelkomponenten ist nicht sinnvoll möglich). Wird beispielsweise der Rotor betrachtet, so umfasst die funktionelle Einheit alle Unterkomponenten bestehend aus Rotornabe sowie den drei Rotorblättern. Die genaue Materialzusammensetzung der Systemkomponenten ist in Tabelle 5.2 in

Kapitel 5.2.1 dargestellt. Umweltauswirkungen werden anhand der Einflusskategorien Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP) und Photochemical Ozone Creation Potential (POF) unter Verwendung der CML-Methodik beschrieben (vgl. methodische Entscheidungen in Kapitel 4.3). Alle Umweltauswirkungen werden für den aktuellen Zeitraum berechnet. Zusammengefasst soll die Methodik dieser Arbeit einen ganzheitlicheren und zugleich differenzierteren Vergleich der End-of-Life-Strategien erlauben, der so in der Literatur bislang nicht vorliegt (vgl. Forschungslücke in Kapitel 3.4.4).

5.2 Datengrundlage und Datenaufbereitung

Wie in Literaturanalyse in Kapitel 3.4 beschrieben sind neben methodischen Annahmen und Systemgrenzen auch verwendete Daten ein großer Einflussfaktor für die Qualität von Lebenszyklusanalysen. Für die Erarbeitung der in dieser Diplomarbeit definierten Fragestellung wird auf die Datenqualität aus externen Quellen vertraut, diese beinhalten die ecoinvent v3.11 Datenbank sowie Daten aus wissenschaftlichen Publikationen. Zusätzlich zur Literaturrecherche waren auch punktuelle Suchanfragen für die Datenbeschaffung in den nachstehenden Kapiteln nötig, diese wurden entsprechend dokumentiert. Oftmals mussten aufgrund von Datenlücken Annahmen getroffen werden (z. B. für die genaue Materialzusammensetzung der Rotorblätter), auch diese wurden anhand wissenschaftlicher Quellen und branchenüblicher Daten begründet und festgehalten.

5.2.1 Materialliste der Vestas V90

Alle verwendeten Daten, Quellen sowie notwendige Annahmen zur Aufbereitung der Materialzusammensetzung der Vestas V90 sind in Anhang 7.1 angeführt. Die daraus entstandene Materialliste ist in Tabelle 5.2 beschrieben und weist die entsprechenden Materialmengen den jeweiligen Systemkomponenten zu.

Wenn nicht anders erwähnt, werden alle nachstehend im LCI (vgl. Kapitel 5.3) verwendeten Materialdaten dieser Liste bzw. Anhang 7.1 entnommen.

5.2.2 Standort der Windkraftanlage und Systemgrenzen

Als Standort für die betrachtete Windkraftanlage wird Niederösterreich gewählt, da hier im Jahr 2024 58 % der in Österreich installierten Windkraft-Leistung verbaut war (BMK, 2024a). In den Windparks Poysdorf-Wilfersdorf im Bezirk Mistelbach sind insgesamt 14 Vestas V90-2MW Windkraftanlagen installiert, so viele wie in keinem anderen Windpark in Österreich. Der nächstgelegene Ort ist Wilfersdorf und Transportstrecken werden im Weiteren für diesen Anlagen-Standort modelliert. Diese 14 Vestas V90-2MW Windkraftanlagen produzierten insgesamt durchschnittlich 74 GWh/Jahr, was

Tabelle 5.2: Materialzusammensetzung der Vestas V90-2MW Windkraftanlage auf Ebene der Systemkomponenten (Deutsches Umweltbundesamt, 2022; Garrett & Rønde, 2011; Schweizer Bundesamt für Energie, 2015; Sobaszek et al., 2023; Vestas Wind Systems A/S, 2009, 2011)

Angaben in [kg]	Fundament	Turm (80m)	Gondel	Rotor	Gesamt	
Beton	750 880	0	0	0	750 880	71,97%
Stahl	38 280	147 032	26 566	1 750	213 628	20,48%
Stahl (niedr. legiert)	38 280	147 032	3 091	1 750	190 153	18,23%
Stahl (hochlegiert)	0	0	23 475	0	23 475	2,25%
Gusseisen	0	0	34 805	17 800	52 605	5,04%
Aluminium	0	749	2 451	0	3 200	0,31%
Kupfer	40	220	1 691	60	2 011	0,19%
Polymere	120	0	0	340	460	0,04%
Thermoplaste	120	0	0	340	460	0,04%
Elastomere	0	0	0	0	0	0,00%
Duromere	0	0	0	0	0	0,00%
Faserverbundwerkstoffe	0	0	1 838	18 050	19 888	1,91%
GFK	0	0	1 838	16 383	18 221	1,75%
CFK	0	0	0	1 667	1 667	0,16%
Schmieröl	0	0	648	0	648	0,06%
Total	789 320	148 000	68 000	38 000	1 043 320	

einer Erzeugung pro Windkraftanlage von 5 285 MWh/Jahr entspricht (Windkraft Simonsfeld AG, 2012). In der von Vestas durchgeführten Lebenszyklusanalyse produziert eine Vestas V90 im modellierten Fall im 20-Jahres-Schnitt zum Vergleich 6 257 MWh/Jahr (Garrett & Rønde, 2011).

5.3 Life Cycle Inventory (LCI) der Szenarien

Das Ergebnis des LCI ist eine Liste quantifizierter Elementarflüssen des Produktsystems in der Darstellung der funktionalen Einheit (Hauschild, 2018; ISO, 2006b). In der Bestandsaufnahme werden Informationen über Ressourcen-, Material-, Halbzeug- oder Produktinputs und Outputs wie Emissionen, Abfälle und Produkten mit Restwert aller für die Durchführung der Lebenszyklusanalysen relevanter Prozesse gesammelt und anhand der funktionalen Einheit skaliert (ISO, 2006b).

Ziel dieses Abschnittes ist somit die vollständige Aufbereitung der einzelnen Prozessschritte und ecoinvent-Aktivitäten aller in Tabelle 5.1 definierter Szenarien. Diese sind die Grundlage für das spätere LCIA. Die gewählte Vorgehensweise ist die schrittweise Aufbereitung der EoL-Strategien für die Anlage und die jeweiligen Komponenten sowie die Extraktion relevanter Daten aus der Literatur. Sofern keine Literatur identifizierbar ist, werden Näherungen oder Annahmen getroffen. Den Prozessen werden jeweils auch ecoinvent-Aktivitäten zugewiesen, diese wurden sorgfältig gewählt, um den zutreffenden Fall möglichst präzise abzubilden.

5.3.1 Struktur des Life Cycle Inventory (LCI)

Für die Aufbereitung der in den jeweiligen Szenarien verwendeten Parametern bzw. Zwischen- und Endergebnissen (vgl. Anhänge 7.2–7.6) wird zur Erhöhung der

Lesbarkeit der in Tabelle 5.3 dargestellte Farbcode gewählt, es wird unterschieden zwischen gelb markierten Primärparametern, also all jene Parameter, die zur weiteren Ermittlung der Input-Parameter der Lebenszyklusanalyse verwendet werden und zum ersten Mal im Dokument auftreten. Weiters gibt es grau markierte Zellen, welche Rechengrößen, die sich aus den gelb markierten Parametern der Primärverarbeitung ableiten und zuletzt orange markierte Zellen, die als Input für die eigentlichen LCA-Berechnungen im ActivityBrowser verwendet werden, letztgenannte sind gleichzeitig das Ergebnis der LCI-Phase. Somit lässt sich zusammenfassend sagen, dass alle nicht-orangen Felder in der Aufbereitung der LCA-Input-Parameter dienen. Insbesondere in den in den Anhängen 7.2–7.6 gesammelten Tabellen zur Vorbereitung der LCI-Daten findet der hier definierte Farbcode Anwendung.

Tabelle 5.3: Farbcode für die Verwendung verschiedener Parameter in den Vorberechnungen des LCI

Input Parameter Primärverarbeitung
Residualgrößen bzw. bereits zuvor verwendeter Input Parameter Primärverarbeitung
Output Parameter der Primärverarbeitung = Input Parameter LCA

Wie nachstehend beschrieben gliedern sich alle identifizierten umweltrelevanten Lebenszyklus-Aktivitäten (rein menschliche Tätigkeiten wie die Wartung eines Getriebes sind demnach nicht umweltrelevant, der Transport des Wartungsteams hingegen schon) in den Szenarien in eine der folgenden fünf Kategorien:

- Montage & Demontage,
- Herstellung neuer Komponenten,
- Transporte,
- Entsorgung sowie
- Outputs und Avoided Burden.

Innerhalb dieser fünf Kategorien werden in den folgenden Kapiteln identifizierte Prozesse mittels ecoinvent-Aktivitäten modelliert und in kursiver Schrift im Fließtext beispielsweise mit ‚*steel production, electric, low-alloyed (AT)*‘ hervorgehoben. Der Klammerausdruck am Ende beschreibt dabei die für diesen Prozess gültige Region. Die Herkunft der LCI-Daten ist dabei die ecoinvent v3.11 Cut-off Datenbank (ecoinvent Association, 2024). Anhand der vorgegebenen Struktur werden auch die Systemgrenzen für die Szenarien ersichtlich. So betrachten die Szenarien der verlängerten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) alle Prozesse nach dem Ende der ursprünglich geplanten Betriebsdauer von 20 bis zur tatsächlichen Stilllegung der Windkraftanlage. Die Szenarien der Materialverwertung (Repurpose, Recycle, Recover) enthalten alle Aktivitäten von der tatsächlichen Stilllegung der Vestas V90 bis hin zur Verwertung der Materialien. Diese beinhalten auch die Weiterverarbeitung zu thermischer und elektrischer Energie, Erzeugnissen und

Sekundärmaterialien, die in weiteren Anwendungen genutzt werden können. Die weitere Nutzung ist nicht Teil der vorliegenden Betrachtung. Wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, handelt es sich somit in allen Szenarien um gate-to-gate Lebenszyklusanalysen.

a. Montage & Demontage

Prozesse der Kategorie Montage und Demontage umfassen alle umweltrelevanten Tätigkeiten, die baustellenseitige Arbeiten für den Auf- bzw. Abbau der Windkraftanlagen-Komponenten beinhalten. Darunter fallen die Manipulation von Anlagenkomponenten mit Kranen sowie Aushub- und Zerkleinerungsarbeiten mit einem Bagger.

Zur Abschätzung des Energieaufwands für das Montieren von Ersatzteilen und Systemkomponenten mithilfe eines Krans wird zunächst die potenzielle Energie anhand der Schwerpunktlage ermittelt. Zusätzlich wird berücksichtigt, wie effizient der verwendete Kran Dieselmotorkraftstoff in mechanische Energie umwandelt. In der wissenschaftlichen Literatur ist die Annahme üblich, dass Demontage und Montage mit einem Kran mit den gleichen Energieaufwänden berücksichtigt werden, da sie ähnliche Prozesse in umgekehrter Reihenfolge beinhalten (Ozsahin et al., 2022; Pincelli et al., 2024). Dieser Ansatz wird hier übernommen. Ein Hub-Kran setzt mit einem Wirkungsgrad von 20 % Kraftstoff in mechanische Energie um (Schweizer Bundesamt für Energie, 2015). Diesel hat einen Heizwert von 9,8 kWh/L (Hoinkis, 2016), daraus kann der Dieserverbrauch in kWh bzw. in MJ auf die genannte Weise berechnet werden.

Sofern alte Rotorblätter nicht weiterverwendet werden (Reuse), ist es üblich, diese nach der Demontage und vor dem Abtransport zu zerkleinern, sodass ein genehmigungspflichtiger Sondertransport verhindert wird. Entsprechend einem Bericht des Deutschen Umweltbundesamtes (2022) werden dafür generell mobile Sägen verwendet. Es wird angenommen, dass bereits in diesem Schritt CFK, GFK sowie andere Materialien der Rotorblätter voneinander getrennt und sortenrein für den Abtransport vorbereitet werden. Die Abschätzung der hierbei auftretenden zusätzlichen Umweltemissionen ist aufwendig, auch weil bei der Zerkleinerung Partikel frei werden, die in die Umwelt gelangen. Daher wird dieser Schritt vernachlässigt, es ist ratsam, so wenig Zerkleinerungsschritte wie möglich vor dem Abtransport durchzuführen (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Bei der baustellenseitigen Zerkleinerung der Rotorblätter wird angenommen, dass ein 44 m langes Rotorblatt mit mobilen Diamantsägen und einer Staubabsaugung in sieben Schnitten in acht Teile mit einer Länge von ca. 5,5 m zertrennt werden, die im Anschluss auf Transporter geladen werden. Es wird angenommen, dass dafür eine Diamantsäge KDS50 des Herstellers Kemroc mit einer Nennleistung von 135 kW

eingesetzt wird, die in 3 Stunden ein Vestas V90 Rotorblatt für den Abtransport zerkleinert (Recycling Magazin, 2021). Der Energiebedarf der Diamantsäge am Bagger pro Rotorblatt errechnet sich somit zu 405 kWh. Der Hersteller empfiehlt die Verwendung der Diamantsäge mit einem 15–25 t Bagger, wir nehmen einen 20 t Bagger an. Entsprechend einem Bericht von Winkler et al. (2016) wurden die Kraftstoffverbräuche von Baumaschinen analysiert, wobei ein Raupenbagger mit 20–25 t rund 0,14 l/kWh verbraucht, insgesamt werden somit beim Zerschneiden eines Rotorblattes 56,7 l Diesel vom Bagger in 405 kWh mechanische Energie umgesetzt.

b. Herstellung neuer Komponenten

Hier wird die Herstellung von Komponenten beschrieben, in dieser Diplomarbeit beschränkt sich dies auf Ersatzteile wie Rotorblätter, Getriebe und Generatoren sowie Schmieröl. Meist wurden bereits marktübliche Fertigungsverfahren in den gewählten ecoinvent-Prozessen miteinbezogen, da die Herstellungsprozesse für die Vielzahl an Komponenten aus der Materialliste der Vestas V90 aus Kapitel 5.2.1 unmöglich zu ermitteln ist. Es werden ausschließlich in den EoL-Strategien der verlängerten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) Ersatzteile sowie Schmieröl hergestellt.

c. Transporte

Unter Transporte fallen alle Bewegungen von Menschen und Materialien aus Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie Abtransporte demontierter Materialien und Weitertransporte von Komponenten der Vestas V90 Windkraftanlage. Zum Abschätzen der Transportdistanzen und -methoden wird das Online-Tool RouteScanner (RouteScanner, 2024) für kombinierte Transportmethoden (z. B. Seefracht, Schubverband & Lkw) bzw. die Routenberechnung von Google Maps (Google LLC, 2024) für reine Lkw-Transporte herangezogen. Üblicherweise wird der stellvertretende ecoinvent-Prozess *‘market for transport, freight lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) genutzt, um Lkw-Transporte in Europa abzubilden. Für Straßen-Schwertransporte, wie sie für Rotorblätter und Turm-Segmente nötig sind, wird ein Erhöhungsfaktor von 1,2 bei den Tonnenkilometern (tkm) der Transportmethode in ecoinvent hinzumultipliziert, da diese Straßentransporte mit Teleskoplädern stattfinden (Renk & Waalkes, 2024).

Oftmals wurde bei Unklarheiten Wien als Ort des An- bzw. Abtransportes angenommen, da davon auszugehen ist, dass hier eine Vielzahl infrastruktureller Gegebenheiten auffindbar sind. Des Weiteren sind die Verladeprozesse in ecoinvent bereits in den Transport-Aktivitäten berücksichtigt (Müller, 2018).

d. Entsorgung

Unter der Entsorgung werden alle Prozesse der stofflichen und thermischen Verwertung (Recycling und Recover) zusammengefasst. Diese umfassen das Recycling der Metalle, des Betons, des Altöls, der Polymere, des GFK, des CFK sowie die Verbrennung der Polymere, die Mitverarbeitung von GFK in der Zementproduktion und die Mitverarbeitung von CFK in der Karbidproduktion. Diese Prozesse werden in den nachstehenden Kapiteln erläutert.

Bei der Lebensdauererweiterung, Reuse und Repower werden Komponenten im Zuge der um zehn Jahre verlängerten Lebensdauer erneuert, darunter das Getriebe, der Generator, Rotorblätter und das Öl. Dabei entstehen Materialien, die entsorgt werden müssen. In dieser Diplomarbeit wird für diese geringen Materialmengen angenommen, dass diese ebenfalls der entsprechend der in Kapitel 5.3.6 entwickelten Recycling-Szenarien mit den zugehörigen Transporten sowie Outputs und Avoided Burden (vermiedene Aufwände) aufbereitet und modelliert werden.

e. Outputs und Avoided Burden

Oftmals entstehen beispielsweise durch Materialrecycling und -verwertung, aber auch durch eine verlängerte Lebensdauer der Windkraftanlage Materialressourcen wie Sekundärmetalle und Energieressourcen wie Wärme und Elektrizität. Für die erweiterte Betriebsdauer von Windkraftanlagen durch die EoL-Strategien Lebensdauererweiterung, Reuse und Repower wird wie in den nachstehenden Kapiteln beschrieben angenommen, dass über einen Zeitraum von weiteren 10 Jahren weiterhin elektrische Energie produziert wird. Dadurch wird die Produktion dieser Menge an Elektrizität des in Österreich marktüblichen Strommix, modelliert durch den ecoinvent-Prozess *‘market for electricity, high voltage (AT)’* (ecoinvent Association, 2024), vermieden. Diese Vermeidung wird in der vorliegenden Diplomarbeit dadurch berücksichtigt, dass dieselbe Menge zusätzlich produzierter Energie mit einem negativen Vorzeichen in der LCA gewichtet wird und somit einen Umweltnutzen / eine Gutschrift erzeugt. In der Literatur bezeichnet man diese Herangehensweise als Avoided Burden (Frischknecht, 2007). Dasselbe Vorgehen gilt laut Frischknecht (2007) für Materialien, die aus Recycling oder Energie, die aus der Mitverbrennung entstehen.

Aufgrund der in Kapitel 5.1 definierten funktionellen Einheit müssen für die vorliegenden Bewertungen die vermiedene Energiemengen der EoL-Strategien Lebensdauererweiterung, Reuse und Repower zunächst auf die Systemkomponenten der Vestas V90 aufgeteilt werden. Die inkludierte Literatur gibt keine Auskunft über die Aufteilung dieser Energiemenge auf die Systemkomponenten der Windkraftanlage. Die in dieser Diplomarbeit angenommene Verteilung richtet sich dabei nach den jeweiligen Umwelteinflüssen der Komponenten in der wichtigsten Einflusskategorie, dem Global Warming Potential (Feng et al., 2023), der vom Hersteller durchgeführten Lebenszyklusanalyse der Vestas V90. Demnach entfallen 34,1 % auf den Turm,

26,2 % auf die Gondel, 25 % auf den Rotor sowie 14,7 % auf das Fundament (Garrett & Rønde, 2011). Wie zuvor in Kapitel 5.2.2 erwähnt, entspricht die Erzeugung je Windkraftanlage im betrachteten Windpark in Poysdorf-Wilfersdorf 5 285 MWh/Jahr (Windkraft Simonsfeld AG, 2012) und die Gesamtproduktion wird für die Szenarien 1.1–3.4 anhand dieser Anteile auf die Systemkomponenten verteilt.

5.3.2 Lebensdauererweiterung

Nach 20 Jahren ursprünglich vorhergesehener Betriebsdauer erfolgt in diesem Szenario eine Erweiterung dieser um weitere 10 Jahre. Entsprechend Alsaleh & Sattler (2019) ist das ein übliches Szenario für Windkraftanlagen. Auch Vestas spricht von möglichen Betriebsdauern ihrer Windkraftanlagen von 30 Jahren und mehr (Garrett & Rønde, 2011). Eine wichtige Voraussetzung für die Lebensdauererweiterung von Windkraftanlagen ist, dass die Komponenten bei der Inspektion nach 20 Jahren in einem unbeschädigten Zustand sind. Entsprechend der zuvor getroffenen Auswahl der Szenarien (siehe Tabelle 5.1 in Kapitel 5.1) kann die Lebensdauererweiterung für alle Komponenten durchgeführt werden, wodurch die Lebensdauer gesamter Anlagen verlängert wird.

Sanierungsarbeiten nach 20 Jahren

Gervásio et al. (2014) geht zu Beginn einer Lebensdauererweiterung um weitere 20 Jahre davon aus, dass geringfügige Arbeiten zur Rehabilitation des Turms, also die Erneuerung der Beschichtung, zum Einsatz kommen. Diese wird für die Lebensdauererweiterung um 10 Jahre vernachlässigt, da die Lebensdauererweiterung nur halb so lange wie im von Gervásio et al. (2014) beschriebenen Fall angenommen wird, keinerlei Daten zur Beschichtung des Stahlturms der Vestas V90 direkt in ausgewiesen sind und die verwendeten Mengen zur Behebung schadhafter Stellen gering eingestuft werden. Prozesse wie die Inspektion der Windkraftanlage nach der vorgesehenen Betriebsdauer sind größtenteils menschliche Aktivitäten mit vernachlässigbaren Umwelteinflüssen (Cao et al., 2024; Li et al., 2022).

Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten für die erweiterte Lebensdauer von 10 Jahren

Der Austausch wichtiger Komponenten durch Verschleiß oder Schäden ist zentral für den weiteren Betrieb von Windkraftanlagen, dabei sind meist Beschädigungen an den Rotorblättern, am Getriebe sowie am Generator für Betriebsstörungen verantwortlich (Echavarria et al., 2008; Sheng, 2013). Die jährlichen durchschnittlichen Ausfallraten dieser Komponenten wurden aus zwei unabhängigen Quellen bezogen, in Tabelle 5.4 dargestellt und entsprechende Mittelwerte berechnet. Obwohl diese Quellen alt sind, eignen sie sich für die Lebenszyklusanalysen in der vorliegenden Arbeit, da alle Vestas V90 Windkraftanlagen in Österreich zwischen 2005 und 2014 installiert wurden (vgl. Kapitel 2.2.2).

Tabelle 5.4: Jährliche Ausfallraten wichtiger Windkraft-Komponenten

	Mittelwert (eigene Berechnung)	(Sheng, 2013)	(Echavarria et al., 2008)
Rotorblätter	2,2 %	2,0 %	2,4 %
Getriebe	3,1 %	5,0 %	1,2 %
Generator	2,9 %	3,5 %	2,2 %

Es wird angenommen, dass diese Komponenten bei einem Ausfall gänzlich getauscht und die geringen Mengen an Materialien im Anschluss recycelt werden.

Für Windkraftanlagen ist ein frühzeitiges Ausfallverhalten von Komponenten in den ersten Jahren des Betriebes häufig der Fall, was meist die Folge von Produktionsungenauigkeiten oder Mängel bereits vor der Anlageninstallation zurückzuführen ist. Die jährlichen Ausfallraten sinken in den darauffolgenden Jahren wieder. Deswegen wird angenommen, dass sich diese Ausfallquoten in den weiteren zehn Jahren der Lebensdauererweiterung auch nicht erheblich ändern. Weitere Komponenten mit jährlichen Austauschraten von weniger als 0,5 % werden in der vorliegenden LCA-Studie vernachlässigt. Diese sind z. B. Rotor, Azimutsystem, Gondel, Turm, Transformator und Schaltschrank (Echavarria et al., 2008).

Für den Betrieb der Vestas V90 ist der Wechsel von 200 kg Schmieröl jedes zweite Jahr ebenfalls essenziell (Garrett & Rønde, 2011; Schweizer Bundesamt für Energie, 2015). Im vorliegenden LCA-Modell werden auch deren Herstellung sowie deren Transport berücksichtigt.

Es wird angenommen, dass die Materialien alter Komponenten, die im Zuge von Reparatur und Wartungsarbeiten ausgetauscht werden und getauschte Komponenten und Materialien abtransportiert und anhand der materialspezifischen Methoden wie in Kapitel 5.3.6 beschrieben recycelt werden.

Die Transporte während der erweiterten Lebensdauer umfassen den Austausch kaputter Komponenten (Garrett & Rønde, 2011), den Wechsel des Getriebeöls alle zwei Jahre mit einer Transportstrecke von jeweils 100 km pro Standort und Personentransporte des Wartungsteams (Schweizer Bundesamt für Energie, 2015). Für Letztere werden wie in der von Vestas durchgeführten Lebenszyklusanalyse 2160 km für einen Windpark mit 25 Vestas V90 pro Jahr mit einem Pkw berücksichtigt, das entspricht 86,4 km pro Windkraftanlage pro Jahr (Garrett & Rønde, 2011). Wie bereits beschrieben werden bei der Lebensdauererweiterung nur Schäden am Rotor und der Gondel berücksichtigt. Daher werden die 86,4 km pro Jahr gleichmäßig auf die Lebensdauererweiterung der Gondel (Szenario 1.3) und des Rotors (Szenario 1.4) aufgeteilt.

Szenario 1.1 – Lebensdauererweiterung des Fundaments

Für die Lebensdauererweiterung des Fundaments wurden keine Aktivitäten mit negativen Umwelteinflüssen identifiziert. Die aus der Lebensdauererweiterung des Fundaments gewonnene anteilige Energieproduktion (siehe Kapitel 5.3.1) wird unter den Outputs und Avoided Burden wie in Tabelle 7.1 dargestellt berücksichtigt.

Szenario 1.2 – Lebensdauererweiterung des Turms

Auch für die Lebensdauererweiterung des Turms konnten keine Aktivitäten mit negativen Umwelteinflüssen identifiziert werden. Wie in Szenario 1.1 wird auch hier die aus der Lebensdauererweiterung des Turms gewonnene anteilige Energieproduktion (siehe Kapitel 5.3.1) wird unter den Outputs und Avoided Burden wie in Tabelle 7.2 dargestellt berücksichtigt.

Szenario 1.3 - Lebensdauererweiterung der Gondel

Bei der Lebensdauererweiterung der Gondel fallen wie Beginn von Kapitel 5.3.2 definiert Wartungs- und Reparaturarbeiten an, die damit verbundenen Montagearbeiten sind in Tabelle 7.3a dokumentiert und den jeweiligen ecoinvent-Aktivitäten zugeordnet.

Für die Herstellung des Getriebes und des Generators wurde die Materialzusammensetzung von Sobaszek et al. (2023) übernommen, die nötigen Materialmengen für den Wechsel des Schmieröls wurden vom Schweizer Bundesamt für Energie (2015) übernommen. Dabei wird anhand der in Tabelle 5.4 beschriebenen durchschnittlichen jährlichen Ausfallraten des Getriebes der durchschnittlich prognostizierte Materialbedarf für den Zeitraum der Lebensdauererweiterung von 10 Jahren errechnet, in einem weiteren Schritt werden die Materialmengen in ecoinvent-Prozessen für die Modellierung der Herstellungsprozesse verwendet. Dieses Vorgehen ist für die Lebensdauererweiterung einer Gondel einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage in Tabelle 7.3b dargestellt.

Im Weiteren werden notwendige Parameter für die vorkommenden Transporte modelliert. Diese setzen sich aus den Bewegungen der neuen Komponenten und Betriebsmittel von Orten der Herstellung zur Windkraftanlage in Poysdorf-Wilfersdorf sowie dem Abtransport verbrauchter und verschlissener Materialien für das Recycling. Aus einem Bericht des Schweizer Bundesamt für Energie (2015) wissen wir, dass die Gondel der Vestas V90 aus Bilbao (Spanien) angeliefert wurde, daher wird angenommen, dass das Getriebe und der Generator für die Berechnung der Transportdistanzen ebenfalls aus Bilbao stammen. Für die Transportdistanz des Getriebeöls zum und vom Anlagenstandort wird angenommen, dass diese aus Wien an- und abtransportiert werden. Für die Entsorgung verbleibender Materialien (hochlegierter Stahl, Gusseisen und Kupfer) wird angenommen, dass diese

entsprechend den späten genauen beschriebenen Recycling-Methoden aus Kapitel 5.3.5 verarbeitet werden. Die Transportdistanzen für das Getriebeöl wurden vom Schweizer Bundesamt für Energie (2015) übernommen. Tabelle 7.3c zeigt dieses Vorgehen.

Bei der Entsorgung ausgetauschter Komponenten und Schmieröl werden die in Tabelle 7.3d beschriebenen Materialien recycelt. Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 7.3e dargestellten Outputs und Avoided Burdens.

Szenario 1.4 - Lebensdauererweiterung des Rotors

Ähnlich Szenario 1.3 (Lebensdauererweiterung der Gondel) wird auch in Szenario 1.4 die Lebensdauererweiterung des Rotors entwickelt. Es wird hierbei nur der Ausfall eines Rotorblattes mit der zuvor berechneten jährlichen Ausfallrate von 2,2 % (vgl. Tabelle 5.4) berücksichtigt.

Für die Abschätzung der Energieaufwände der Montage und Demontage des Rotorblattes wird, wie zuvor in Szenario 1.3 mit dem Erwartungswert der benötigten Materialmengen über 10 Jahre kalkuliert. Dieser beträgt hier 1 467 kg Rotorblätter. Die theoretische Hubenergie zur Nabenhöhe von 80 m sowie die damit verbundenen Kraftstoffverbräuche über 10 Jahre der Lebensdauererweiterung berechnen sich wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Weiters wird wie in Kapitel 5.3.1 besprochen das ersetzte Rotorblatt mit einer Diamantkreissäge zerschnitten. Der zugehörige Prozess des Zerkleinerns des Rotorblattes und alle relevanten Parameter sind in Kapitel 5.3.1 ausführlich beschrieben und finden auch hier Anwendung. Nun liegt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Rotorblatt über einen Zeitraum 10 Jahren gewechselt werden muss bei 2,2 % (jährliche durchschnittliche Ausfallquote eines Rotorblattes), somit errechnet sich der zu erwartende Diesel-Verbrauch für die Zerkleinerung des Rotorblatts mit einem Bagger und Diamantkreissäge in den 10 Jahren der Lebensdauererweiterung im Durchschnitt zu 12,5 l. Diesel hat einen Energieinhalt von 36 MJ/l (vgl. Kapitel 5.3.1). Der Kraftstoffverbrauch in der verlängerten Lebensdauer beträgt somit 449,06 MJ. Alle Berechnungen finden sich zusammengefasst in Tabelle 7.4a.

Für die Herstellung neuer Komponenten lassen sich mit Ausnahme der Produktion der Karbonfasern rasch ecoinvent-Aktivitäten ableiten. Für das Abschätzen der Produktion der Karbonfasern, wofür es keine spezifische ecoinvent-Aktivität gibt, wird auf einen Vorschlag aus einem Fachartikel von Jacquet et al. (2024) zurückgegriffen. Hierbei wird die Herstellung von Karbonfasern durch insgesamt sechs ecoinvent-Aktivitäten modelliert, wobei ein japanischer Strommix angenommen wird, da hier laut Jacquet et al. (2024) viele Karbonfaser-Hersteller beheimatet sind. In Tabelle 7.4b sind die berechneten Werte sowie die zugehörigen ecoinvent-Aktivitäten angeführt (ecoinvent Association, 2024; Jacquet et al., 2024).

Entsprechend dem Schweizer Bundesamt für Energie (2015) kommen die Rotorblätter mit einem Gewicht von 6 667 kg der Vestas V90 aus Lem (DK), wobei diese aufgrund ihrer Länge von 44 m öffentlichen Straßen nur per Sondertransport auf beförderbar sind. Somit wird versucht, die Sondertransport-Strecken möglichst kurz zu halten und die Rotorblätter über Containerschiffe sowie Schubverbände in Binnengewässern zum Anlagenstandort zu befördern. Der Sondertransport mit Teleskopladern wird wie zu Beginn in Kapitel 5.3.1 mit einem Erhöhungsfaktor von 1,2 beaufschlagt. Außerdem sind 50 % der Transporte für das Wartungsteam (432 km in 10 Jahren), wie in Szenario 1.3 besprochen berücksichtigt (Garrett & Rønde, 2011). In Tabelle 7.4c sind die entsprechenden Daten für alle Transporte dieses Szenarios ausgewiesen.

Bei der Entsorgung ausgetauschter Rotorblätter werden die in Tabelle 7.4d beschriebenen Materialien recycelt. Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 7.4e dargestellten Outputs und Avoided Burden aus der vermiedenen Energieproduktion durch den weiteren Betrieb der Windkraftanlage um weitere 10 Jahre (vgl. Kapitel 5.3.1), die Vermeidung in der Materialherstellung (vgl. Kapitel 5.3.6) sowie die Vermeidung von Energieproduktion aus der Verbrennung von Polymerabfällen.

5.3.3 Reuse

Im in dieser Diplomarbeit betrachteten Reuse-Szenario wird die Vestas V90-2MW Windkraftanlage nach 20 Jahren Regelbetrieb an einem anderen Standort außerhalb Österreichs (ohne Zwischenlagerung) für weitere 10 Jahre betrieben. Windkraftanlagen können entsprechend Alsaleh & Sattler (2019) sowie Garrett & Rønde (2011) über 30 Jahre und länger in Betrieb bleiben, weshalb im Reuse-Szenario dieser Diplomarbeit ebenfalls von einer Erweiterung um 10 Jahre ausgegangen wird. Eine wichtige Voraussetzung ist auch hier, dass die Komponenten bei der Inspektion nach 20 Jahren in einem unbeschädigten Zustand sind (Mendoza et al., 2022). Es wird daher angenommen, dass die Materialien alter Komponenten, die im Zuge von Reparatur und Wartungsarbeiten ausgetauscht werden, wie bei der Lebensdauererweiterung (vgl. Kapitel 5.3.2) behandelt und anhand der materialspezifischen Methoden wie in Kapitel 5.3.6 beschrieben recycelt werden.

Betrachtet man die identifizierbaren umweltrelevanten Prozesse (Alsaleh & Sattler, 2019; Li et al., 2022), so ist das Reuse-Szenario der Lebensdauererweiterung sehr ähnlich, da hierbei alle Komponenten der Windkraftanlage mit Ausnahme des Fundaments über die Betriebsdauer hinaus betrieben werden. Reuse ist ebenfalls eine Strategie zur Verlängerung der Lebensdauer und wird in der vorliegenden Diplomarbeit aufgrund der Gleichheit vieler Prozesse wie eine Lebensdauererweiterung der Windkraftanlage mit einem zusätzlichen Ortswechsel und allen dazugehörigen Schritten, darunter die Demontage und die erneute Montage der Windkraftanlage, modelliert (Gervásio et al., 2014).

In diesem Szenario wird angenommen, dass die Windkraftanlage über eine Strecke von 300 km zum neuen Anlagenstandort transportiert wird, dies umfasst unter anderem windstarke Regionen von Tschechien, der Slowakei und Ungarn. Üblicherweise werden gebrauchte Windkraftanlagen über Online-Plattformen von Drittanbietern weiterverkauft und wiederverwendet (Mendoza et al., 2022). Das Deutsche Umweltbundesamt (2022) gibt ebenfalls bekannt, dass in der Vergangenheit ein relevanter Anteil an Windkraftanlagen für Reuse aus Deutschland ins Ausland exportiert wurde. Laut Delaney et al. (2023) ist die Wiederverwendung von Windkraftanlagen in Osteuropa eine gängige Praxis.

Die Systemgrenze für Reuse schließt somit alle Prozesse ab der Demontage am ursprünglichen Standort der Vestas V90, den Transport der Windkraftanlage zum neuen Standort (ohne Fundament), die erneute Errichtung der Windkraftanlage sowie den Betrieb über weitere 10 Jahre (für den Betrieb werden alle Prozesse aus der Lebensdauererweiterung in den Szenarien 1.1 bis 1.4 übernommen) mit ein. Für die EoL-Strategie Reuse werden Szenarien für Gondel, Rotor und Turm entwickelt. Für die Wiederverwendung des Fundaments wurden keine Quellen identifiziert, weshalb dieses Szenario in der vorliegenden Diplomarbeit nicht betrachtet wird.

Sanierungsarbeiten nach 20 Jahren

Es wird in dieser Diplomarbeit aufgrund der zuvor genannten Gründe angenommen, dass die Sanierungsarbeiten für Reuse der Vestas V90 dieselben sind wie bei der Lebensdauererweiterung (vgl. Kapitel 5.3.2), aber dass anhand der verwendeten wissenschaftlichen Literatur auch hierbei keine umweltrelevanten Parameter identifiziert wurden.

Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten für die erweiterte Lebensdauer von 10 Jahren

Es wird die Annahme getroffen, dass die Windkraftanlage an einem Standort wiederverwendet wird, der ähnliche Bedingungen und Möglichkeiten bietet, sodass alle Transportwege, -distanzen und LCA-Aktivitäten aus der Lebensdauererweiterung in die Reuse-Szenarien übernommen werden können. Auch die Herstellung ausgefallener Komponenten wird aus der Lebensdauererweiterung übernommen. Die Reuse-Szenarien der jeweiligen Systemkomponenten (Szenario 2.2–2.4) beinhalten somit das gesamte zutreffende Szenario der Lebensdauererweiterung (Szenario 1.2–1.4) mit allen Aktivitäten aus Kapitel 5.3.2. Beispielsweise wird das Szenario 1.2 (Lebensdauererweiterung des Turms) gänzlich in Szenario 2.2 (Reuse des Turms) integriert und um weitere Prozesse erweitert.

Demontage und Wiedererrichtung der Windkraftanlage nach 20 Jahren

Wie in Kapitel 5.3.1 definiert, werden die Montage und Demontageaufwände über die potenzielle Energie abgeschätzt und in Kraftstoffverbrauch umgewandelt. Wendet

man diese Methodik auf die vorliegende Windkraftanlage an und entnimmt die entsprechenden Gewichte der Systemkomponenten aus Tabelle 5.2, so lassen sich die Kraftstoffverbräuche für Kranarbeiten auf Systemkomponentenebene berechnen. Dabei wird angenommen, dass die Schwerpunkte von Rotor und Gondel auf 80 m Nabenhöhe liegen und der des Turms auf halber Nabenhöhe.

Transport des Turms, der Gondel und des Rotors zum neuen Ort

Für den Transport der Turbine an den neuen Anlagenstandort werden Sondertransporte eingesetzt, dabei werden die einzelnen Stahlurm-Segmente sowie der Rotor in seine drei Blätter und Nabe zerlegt. Die Gondel wird ebenfalls als Sondertransport in einem Stück transportiert (Garrett & Rønde, 2011; Gervásio et al., 2014).

Die jeweiligen Szenarien und die Vorbereitung auf die LCA-Modellierung werden nachfolgend systematisch erarbeitet.

Szenario 2.2 – Reuse des Turms

Im in dieser Diplomarbeit betrachteten Reuse-Szenario des Turms werden alle Schritte der Lebensdauererweiterung des Turms (Szenario 1.3) wie zuvor angemerkt übernommen, aber hier nicht erneut angeführt, diese umfassen die in Tabelle 7.2 dargestellten ecoinvent-Prozesse.

In Tabelle 7.5a werden zusätzlich die Energieverbräuche bei der Montage und Demontage des Turms dargestellt und entsprechende ecoinvent-Aktivitäten zugeordnet.

In Tabelle 7.5c sind die Sondertransporte für den Ortswechsel eines Turms einer Vestas V90 Windkraftanlage sowie der zugeordnete ecoinvent-Prozess dargestellt, für diese gilt erneut ein Gewichtserhöhungsfaktor von 1,2.

Szenario 2.3 – Reuse der Gondel

Im Reuse-Szenario der Gondel werden ebenfalls alle Schritte der Lebensdauererweiterung der Gondel wie zuvor angemerkt aus Szenario 1.3 übernommen, aber hier nicht erneut angeführt. Diese umfassen die in Tabelle 7.3 dargestellten ecoinvent-Prozesse.

In Tabelle 7.6a werden die Energieverbräuche bei der hinzukommenden Montage und Demontage der Gondel dargestellt und entsprechenden ecoinvent-Aktivitäten zugeordnet.

Tabelle 7.6c zeigt die Sondertransporte für den Ortswechsel einer Gondel einer Vestas V90 Windkraftanlage sowie der zugeordnete ecoinvent-Prozess, für diese gilt erneut ein Gewichtserhöhungsfaktor von 1,2.

Szenario 2.4 – Reuse des Rotors

Wie zuvor wird auch im betrachteten Reuse-Szenario des Rotors alle Schritte der Lebensdauererweiterung des Rotors aus Szenario 1.4 übernommen, aber hier nicht erneut angeführt, diese beinhalten die in Tabelle 7.4 dargestellten ecoinvent-Prozesse.

Tabelle 7.7a zeigt die im Reuse-Szenario zur Lebensdauererweiterung hinzukommenden Energieverbräuche und Tabelle 7.7c die Transportdistanzen und -methoden sowie die zugeordneten ecoinvent-Prozesse für Reuse der Gondel einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage.

5.3.4 Repower

Es lassen sich wenige detaillierte Repowering Projekte von Vestas V90 Windkraftanlagen identifizieren. Oftmals umfassen diese Full Repowering, die eher der Neukonstruktion von Windkraftanlagen oder ganzen Windparks ähneln (Martínez et al., 2018). Partial Repowering Projekte hingegen, wo einzelne Komponenten wie Rotoren oder Generatoren erneuert werden, können im Rahmen dieser Diplomarbeit in sinnvoller Detailtiefe betrachtet werden (Kasner, 2022; Tota-Maharaj & McMahon, 2021).

Das in dieser Diplomarbeit modellierte Partial-Repowering-Szenario wird anhand des Rotorupgrade-Dokuments von Vestas Wind Systems (2020) entwickelt. Dabei wird grob beschrieben, dass Vestas V90 Windkraftanlagen mit neuen Vestas V100-Rotoren mit 100 m Durchmesser ausgestattet werden können und somit insbesondere bei niedrigen Windgeschwindigkeiten bis zu 15 % mehr elektrische Energie produzieren. Die Höchstleistung der Turbine bleibt dabei unverändert bei 2 MW. Die 15 % Leistungssteigerung auf die jährlich produzierte Energiemenge anzuwenden wäre jedoch ein unrealistisch optimistisches Szenario. In dieser Diplomarbeit wird die Erhöhung der jährlich produzierten Energiemenge daher mit 7,5 % angenommen (Vestas Wind Systems A/S, 2020).

Wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben, hat der Windpark in Poysdorf-Wilfersdorf eine durchschnittliche jährliche Elektrizitätsproduktion von 5 285 MWh pro Vestas V90 Windkraftanlage. Nun erhöht sich die Ausbeute durch die Vergrößerung der Rotorblätter im vorliegend definierten Szenario um 7,5 % auf 5 681,4 MWh. Die Verteilung der Energiegewinnung auf die jeweiligen Systemkomponenten erfolgt ebenfalls anhand der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Anteile. Demnach entfallen 34,1 % der produzierten elektrischen Energie auf den Turm, 26,2 % auf die Gondel, 25 % auf den Rotor sowie 14,7 % auf das Fundament.

Weiters wird das vorliegende Szenario aufgrund der mangelnden Datenlage in Anlehnung an andere in dieser Diplomarbeit berücksichtigten Szenarien modelliert, es wird ausdrücklich betont, dass dieses Szenario stark auf Annahmen beruht. Das in

dieser Diplomarbeit beschriebene Partial Repowering entspricht für die Komponenten Fundament, Turm und Gondel exakt den zugehörigen Szenarien der Lebensdauererweiterung einer Vestas V90 nach 20 Jahren Betriebsdauer um weitere 10 Jahre, da diese Komponenten völlig unbeeinflusst bleiben vom Tausch der Rotorblätter. Es wird angenommen, dass die Rotornabe mit den neuen Rotorblättern kompatibel ist und auf der Windkraftanlage verbleibt.

Es wird angenommen, dass die Materialien alter Komponenten, die im Zuge von Reparatur und Wartungsarbeiten ausgetauscht werden und anhand der materialspezifischen Methoden wie in Kapitel 5.3.6 beschrieben recycelt werden.

Szenario 3.1 – Repower Fundament

In diesem Fall entspricht Szenario 3.1 exakt Szenario 1.1 (Lebensdauererweiterung des Fundaments) mit der Ausnahme, dass nun die Produktion der Elektrizität um 7,5 % gesteigert wird, wovon insgesamt ein Prozess im LCI betroffen ist. Tabelle 7.8 zeigt die durch die erweiterte Betriebsdauer vermiedene Elektrizitätsproduktion.

Szenario 3.2 – Repower Turm

Szenario 3.2 entspricht exakt Szenario 1.2 (Lebensdauererweiterung des Turms) mit derselben Ausnahme wie in Szenario 3.1, dass die Produktion der Elektrizität in den 10 Jahren der verlängerten Betriebsdauer um 7,5 % gesteigert wird. Tabelle 7.9 zeigt die durch die erweiterte Betriebsdauer vermiedene Elektrizitätsproduktion.

Szenario 3.3 – Repower Gondel

Szenario 3.3 entspricht exakt Szenario 1.3 (Lebensdauererweiterung der Gondel) mit der Ausnahme, dass nun die Produktion der Elektrizität um 7,5 % gesteigert wird. Tabelle 7.10 zeigt alle resultierenden Prozesse sowie die zugehörigen ecoinvent-Aktivitäten.

Szenario 3.4 – Repower Rotor

Für das Rotor-Upgrade werden alte V90 Rotorblätter demontiert und durch neue V100-Rotorblätter ersetzt. Dafür kommt üblicherweise ein Kran zum Einsatz, wobei angenommen wird, dass sich die Energieverbräuche bei der Montage und der Demontage wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben aus der potenziellen Energie ableiten und in Kraftstoffverbräuche umrechnen lassen. Durch die größeren Rotorblätter erhöht sich das Gewicht pro Rotorblatt von 6 667 kg auf 7 500 kg (Vestas Wind Systems A/S, 2010). Weiters müssen die alten Rotorblätter für den Abtransport zerkleinert werden, was wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben durch den Einsatz einer Diamantkreissäge geschieht. Auch diese Aktivitäten wurden von Szenario 1.4 übernommen und wie in Tabelle 7.11a dargestellt entsprechend angepasst.

Für das Repowering des Rotors müssen zuerst die Aufwände für die Herstellung der Rotorblätter berücksichtigt werden, diese werden in Anlehnung an die Herstellung der Rotorblätter in Szenario 1.4 (Lebensdauererweiterung des Rotors) modelliert, wobei die jeweiligen Materialanteile übernommen werden und die Gewichte mit einen Faktor von 1,125 (Verhältnis aus 7 500 kg eines Vestas-V100-Rotorblatts zu den 6 667 kg eines V90-Rotorblatts) hochskaliert werden, da die genaue Materialzusammensetzung der V100-Rotorblätter nicht bekannt ist. Die zugehörigen Prozesse für die Materialherstellung sowie die zugeordneten ecoinvent-Aktivitäten sind in Tabelle 7.11b dargestellt.

Danach werden die Transporte der neuen V100-Rotorblätter per Spezialtransport sowie die Abtransporte der alten V90-Rotorblätter nach deren Zerkleinerung durchgeführt. Es wird auch hier davon ausgegangen, dass die Rotorblätter in den Vestas Werken in Lem (DK) hergestellt werden, die jeweiligen Orte und Transportstrecken werden dementsprechend aus der Lebensdauererweiterung des Rotors (Szenario 1.4) übernommen. Auch die Transporte für das Wartungsteam werden jenen der Lebensdauererweiterung in Szenario 1.4 gleichgesetzt. Tabelle 7.11c beschreibt alle Transporte für das Repowering des Rotors.

Bei der Entsorgung alter Komponenten, in diesem Fall der drei Vestas V90 Rotorblätter bestehend aus 1 750 kg niedrig legiertem Stahl, 60 kg Kupfer, 340 kg Polymere sowie 16 383 kg GFK und 1 667 kg CFK (Faseranteil je 65 %), wird davon ausgegangen, dass diese recycelt werden. Alle dafür notwendigen Informationen wurden aus dem späteren Szenario 5.4 (Recycling des Rotors) übernommen und sind in Tabelle 7.11d und Tabelle 7.11e für das Repowering des Rotors dargestellt.

5.3.5 Repurpose

Wie bereits in der Literaturanalyse in Kapitel 3 beschrieben, können die Repurposing-Szenarien für die Rotorblätter von Windkraftanlagen vielfältig ausfallen. In dieser Diplomarbeit wurde eine Fußgänger- und Fahrradbrücke als repräsentatives Szenario gewählt. Dieses wird als häufigstes Beispiel in der Literatur angeführt und von Gennitsaris et al. (2023) als einer der nachhaltigsten Repurposing-Anwendungen bewertet.

Zentral ist hierbei, dass in der vorgestellten Repurposing-Anwendung der Einsatz anderer Baumaterialien wie Stahl und Beton verringert wird und dadurch ein Umwelt-Nutzen entsteht. Es wird somit davon ausgegangen, dass die Substitute und substituierten Materialien qualitativ gleichwertig sind für die Verwendung in der Brücke. Nicht Teil der in dieser Diplomarbeit gewählten Betrachtung sind der Transport und die Montage der Repurposing-Erzeugnisse zum Einsatzort sowie deren Entsorgung oder Weiterverwendung am Ende der Betriebsdauer (Nagle et al., 2022).

Szenario 4.4 – Repurposing des Rotors

Beim Repurposing des Rotors wird dieser zuerst mit einem Kran demontiert, die Rotorblätter von der Nabe getrennt und vor dem Abtransport in für Standard-Straßentransporte zerkleinert. Es wird angenommen, dass die Zerkleinerung mit einer Diamantkreissäge, wie in Kapitel 5.3.1 definiert, durchgeführt wird. Um sicherzustellen, dass das gesamte Rotorblatt weiterverwendet wird, werden im von Nagle et al. (2022) behandelten Brücken-Szenario die Rotorblatt-Spitzen als Trennwände für die Viehzucht und Kleingetreide und die Blattnaben für Durchlässe und Schächte weiterverwendet. Weitere geringfügige Fertigungsschritte wie Bohrungen und Schleifarbeiten werden in dieser LCA-Studie als vernachlässigbar angenommen und nicht modelliert. Tabelle 7.12a beschreibt diese Prozesse und die zugewiesenen ecoinvent-Aktivitäten (Nagle et al., 2022).

Anschließend werden die entstandenen Segmente zum Ort des Repurposing transportiert, wo sie in die zuvor genannten Repurposing-Erzeugnisse weiterverarbeitet werden (siehe Tabelle 7.12c). In dieser Diplomarbeit wird angenommen, dass diese Schritte in Wien geschehen und dass dafür keine Sondertransporte nötig sind (Nagle et al., 2022).

Im Sinne des in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Avoided Burden Ansatz wird durch den Einsatz alter Rotorblätter die Produktion von Materialien (hier Stahl und Beton) vermieden. Die substituierten Materialien werden ebenfalls als Umweltnutzen durch ecoinvent-Prozesse mit negativem Vorzeichen berücksichtigt. Tabelle 7.12e beschreibt diese Prozesse und die zugewiesenen ecoinvent-Aktivitäten. Nagle et al. (2022) nehmen an, dass 30 Stück der beschriebenen 21 m langen Rotorblätter mit einem Einzelgewicht von 1 500 kg repurposed werden und 60 Jahre im Einsatz bleiben. Im entsprechenden Szenario von Nagle et al. (2022) ersetzen die insgesamt 45 t Rotorblätter durch 26,5 t Beton (mit einer Dichte von $2\,400\text{ kg/m}^3$) und 10 700 kg niedrig legierter Stahl. Ein 44 m langes Vestas V90 Rotorblatt wiegt hingegen 6 667 kg, daher wird angenommen, dass die von Nagle et al. (2022) im jeweiligen Szenario gewählten Materialmengen je Tonne Rotorblattabfall übernommen werden können (Garrett & Rønde, 2011). Führt man diese Rechnung durch, so ersetzen die drei Rotorblätter eines Vestas V90 Rotors umgerechnet 11 800 kg Beton (entspricht $4,92\text{ m}^3$) und 4 770 kg niedrig legierten Stahl (siehe Tabelle 7.12e). Diese Annahme bringt eine gewisse Unsicherheit mit sich, da das Szenario nicht auf den vorliegenden Fall mit deutlich größeren Rotorblättern angepasst wurde und bietet Potential für angrenzende bzw. weiterführende Arbeiten (Nagle et al., 2022).

Die Rotornabe, bestehend aus 17 800 kg Gusseisen und 200 kg Verbundwerkstoffe, muss ebenfalls berücksichtigt werden. Diese kann nicht sinnvoll im Sinne von Repurpose umfunktioniert werden. Daher wird angenommen, dass diese

entsprechend den materialspezifischen Methoden aus Kapitel 5.3.6 recycelt werden, dargestellt ist dieses Vorgehen in Tabelle 7.12d & Tabelle 7.12e.

5.3.6 Recycle und Recover

Recycle und Recover Szenario

Die Szenarien für Recycle und Recover werden nachstehend gemeinsam erörtert und durchgeführt, da ein Großteil der auftretenden Prozesse gleich oder zumindest ähnlich sind.

Beim Recycling und bei der thermischen Verwertung (Recover) von Windkraftanlagen ist die detaillierte Unterscheidung der verwendeten Materialien von zentraler Bedeutung. Diese ist maßgebend für den Einsatz mechanischer, chemischer oder thermischer Recycling- und Verwertungsverfahren. So sind Metalle wie Stahl, Gusseisen, Aluminium und Kupfer unendlich oft durch Wiedereinschmelzen mechanisch recycelbar, aber nicht thermisch verwertbar (Tota-Maharaj & McMahon, 2021). Üblicherweise verwenden cradle-to-grave-Lebenszyklusanalysen von Windkraftanlagen Recycling-Quoten von Metallen mit etwa 90 %, wobei die verbleibenden 10 % häufig bereits im Zuge der Sammlung verloren gehen (vgl. Kapitel 3.4.1). In dieser Diplomarbeit hingegen wird das höchstmögliche Potential verschiedener EoL-Strategien betrachtet, weshalb beim Recycling und Recovery von einer Sammel-Quote von 100 % ausgegangen wird. Der Beton abgerissener Fundamente kann nach der Zerkleinerung Frischbeton beigemischt und somit ebenfalls recycelt werden. Für das Recycling von Faserverbund-Kunststoffen stehen laut dem Deutschen Umweltbundesamt (2022) derzeit nur die Pyrolyse für CFK sowie das mechanische Recycling von GFK mit einem Technologiereifegrad von 9 zur Verfügung (Deutsches Umweltbundesamt, 2022). Es wird davon ausgegangen, dass das Montageteam Abfallmaterialien vor deren Abtransport vom Betriebsstandort der WKA so weit als möglich für das anschließende Recycling vorbereitet und stofflich trennt. Für alle in der Vestas V90 Windkraftanlage auftretenden Materialien können die in Anhang 7.7 detailliert beschriebenen Recycling-Methoden verwendet werden (Tota-Maharaj & McMahon, 2021).

Bei der Verwertung von Materialien in Windkraftanlagen kommen hingegen ausschließlich kunststoffhaltige Abfälle infrage. Für die Verwertung von GFK wird in dieser Diplomarbeit die Mitverarbeitung in Zementwerken, für CFK die Mitverarbeitung in der Herstellung von Kalziumkarbid (CaC_2) und für die verbleibenden Kunststoffe wird die Verwertung in Müllverbrennungsanlagen zur Elektrizitäts- und Wärmegewinnung betrachtet (vgl. Anhang 7.7). Laut dem Deutschen Umweltbundesamt (2022) sind diese Verfahren aus Umweltsicht die günstigsten Optionen.

Die Systemgrenze für das Recycling und die Verwertung beginnt mit der Dekonstruktion der Windkraftanlage und beinhaltet die Zerkleinerung der Systemkomponenten in Materialfraktionen sowie den Abtransport dieser, sie endet mit dem Recycling-Prozess, wobei dieser die Erstellung recycelter Materialien beinhaltet. Auch die dadurch vermiedenen Belastungen (Avoided Burden), also die vermiedene Herstellung von Materialien oder Energie, sind hierbei entsprechend der ISO 14044 (ISO, 2006b) berücksichtigt.

Recycle & Recover LCA-Prozessschritte

Die Zerlegung der Vestas V90 in ihre Materialströme wird größtenteils vor Ort erledigt, wobei eine Diamant-Kreissäge bzw. Hydraulikscheren eingesetzt werden, um sperrige Teile aus faserverstärktem Kunststoff (Rotorblätter und Gondelgehäuse) bzw. Stahlturm-Segmente nach deren Demontage weiter zu zerkleinern, dadurch werden aufwendige Sondertransporte vermieden (Fachagentur Windenergie an Land, 2023). Für das Fundament kommen baustellenseitig Hydraulikhämmer und später in der Vorbereitung für das Betonrecycling und zur vollständigen Abtrennung des Armierungsstahls Prall- und Backenbrecher zum Einsatz. Zudem werden die Materialien der demontierten Turbine samt Fundament sortenrein zu den jeweiligen Orten des Recyclings transportiert. Die entstandenen Erzeugnisse sind nachstehend im zugehörigen Szenario enthalten (Deutsches Umweltbundesamt, 2022; Pincelli et al., 2024).

Beim Recycling der Materialien entstehen Produkte (z. B. niedrig-legierter Stahl aus niedrig-legiertem Stahl-Schrott), wodurch deren marktübliche Produktion vermieden wird (z. B. von niedrig-legiertem Stahl). Darin liegt der Umweltnutzen des Materialrecyclings, weshalb es ebenfalls berücksichtigt werden muss (ISO, 2006b). Vermiedene Produktionsprozesse von Materialien und Energie sind daher in den jeweiligen Szenarien mit einem negativen Vorzeichen als Avoided Burden berücksichtigt.

In Anhang 7.7 sind die Recycling- und Recovery-Prozesse sowie die zugehörigen ecoinvent-Aktivitäten aller Materialien beschrieben, die recycelt oder thermisch verwertet werden. Für Metalle wird eine Sammel-Quote von 100 % angenommen, da in dieser Diplomarbeit die höchstmöglichen Potenziale von Recycling betrachtet werden (Holcim AG, 2011; Müller, 2018)

Szenario 5.1 – Recycling des Fundaments

Beim Recycling des Fundaments wird im Zuge der Demontage zuerst die darüberliegende Erdschicht abgetragen, um das Fundament freizulegen. Es wird davon ausgegangen, dass zunächst etwa 50 % des Fundamentvolumens (hier insgesamt 158 m³) an Erde freigelegt werden müssen, um das Fundament zugänglich zu machen (Garrett & Rønde, 2011). Danach wird der Stahlbeton des Fundaments mit

Hydraulikhämmern grob zerkleinert und aus der Grube ausgeschaufelt, wobei die Stahlarmierung bereits teilweise und die Kunststoffe sowie das Kupfer vollständig vom Beton getrennt werden. Diese Schritte werden unter dem Einsatz eines Baggers und eines Krans, wie zu Beginn von Anhang 5.3.1 beschrieben, realisiert. Die spezifischen Kraftstoffverbräuche werden mit 0,0612 MJ/kg Fundament aus dem ähnlichen ecoinvent-Prozess *„treatment of waste reinforced concrete, recycling (Europe without Switzerland)“* (ecoinvent Association, 2024) entnommen. Tabelle 7.13a beschreibt diese Prozesse (Scherhauser et al., 2021).

Die Verarbeitung des Armierungsstahls wird wie in Anhang 7.7 dargelegt realisiert und von Marktgrafneusiedl (Burgenland) abtransportiert. Transportdistanzen werden auf diesen Ort bezogen und sind gemeinsam mit der zugewiesenen ecoinvent-Aktivität in Tabelle 7.13c dargestellt.

Nach der Demontage, der baustellenseitigen Zerkleinerung des Fundaments und dessen Abtransport wird dieses in der Baurestmassen-Recyclinganlage der Rohrdorfer GmbH in Marktgrafneusiedl mittels Prall- und Backenbrechern zerkleinert. Der Armierungsstahl wird dabei vom Beton getrennt und ein Großteil des Altbetons wird als Betonsplitt Frischbeton beigemengt. Die elektrische Zerkleinerungsenergie des Stahlbetons wird lt. Müller (2018) auf 1 kWh/t (3,6 kJ/kg) festgelegt. Der Armierungsstahl wird im nächstgelegenen Werk zum Stahlrecycling in Donawitz (STMK) wie zu Beginn von Anhang 5.3.6 beschrieben zu Sekundärstahl verarbeitet. Anhand des gewählten ecoinvent-Prozesses werden aus 38 180 kg Alt-Stahl beim Recycling 34 854 kg Recycling-Stahl. Tabelle 7.13d zeigt die für das Materialrecycling relevanten Daten und ecoinvent-Prozesse (Müller, 2018).

Durch 1 kg Alt-Beton können nach einer Zerkleinerung etwa 0,7 kg Frischbeton (70 % Recycling-Quote) substituiert werden und die Polymere werden ebenfalls anhand der in Anhang 7.7 definierten Methoden recycelt (Holcim AG, 2011; Müller, 2018). Die Menge an erzeugtem Recycling-Stahl (34 854 kg) entspricht der Menge an vermiedenem Primärstahl. Tabelle 7.13d zeigt die Recycling-Prozesse und die zugewiesenen ecoinvent-Aktivitäten, Tabelle 7.13e zeigt die durch das Recycling durch das Recycling des Fundaments vermiedene Primärproduktionen.

Szenario 5.2 – Recycling des Turms

Das Recycling des Turms beginnt mit dessen Demontage, wobei die in Kapitel 5.3.1 definierten Prozesse verwendet werden, danach wird der Turm vor Ort so weit zerkleinert, dass ein Weitertransport ohne Sondertransporter möglich ist. Es wird angenommen, dass dieser Schritt mit hydraulisch betriebenen Scheren an Baggern geschieht, wobei die wissenschaftliche Literatur keine Hinweise über die auftretenden Energieaufwände bei der Zerkleinerung der Stahlturm-Segmente gibt. Es wird, wie zu Beginn von Kapitel 5.3.1 erläutert, angenommen, dass ein 20-t-Bagger mit einer

Leistung von 115 kW eingesetzt wird, um die Hydraulikschere zu bedienen. Es wird weiters angenommen, dass eine spezifische Zerkleinerungsenergie von 10 kWh/t Stahlschrott für diese Zerkleinerung nötig ist, dieser Wert ist eine grobe Abschätzung. Zum Vergleich haben Shredder-Anlagen, die Metallreste sehr viel feiner zerkleinern, einen spezifischen Energieverbrauch von 22,14–46,30 kWh/t (BDSV, 2012). Die Schritte der baustellenseitigen Zerkleinerung und Vorbereitung für den Abtransport sind in Tabelle 7.14a festgehalten.

Es wird in dieser Arbeit wie bereits in Kapitel 5.3.1 angenommen, dass die Abtragung der Turmbeschichtung geringe Umweltauswirkungen hat und weiters aufgrund der mangelnden Datenlage nicht berücksichtigt wird. Der Stahl, das Aluminium und das Kupfer werden wie in Kapitel 5.3.6 beschrieben abtransportiert. Die entsprechenden ecoinvent-Aktivitäten für die Transporte sind in Tabelle 7.14c dargestellt.

Tabelle 7.14d zeigt diese Recycling-Prozesse für die Metalle entsprechend der in Kapitel 5.3.6 beschriebenen Prozesse für das Recycling, Tabelle 7.14e zeigt die durch das Recycling des Turms vermiedene Materialproduktion.

Szenario 5.3 – Recycling der Gondel

Das Recycling der Gondel der Vestas V90 Windkraftanlage beginnt mit der Demontage, im Anschluss wird angenommen, dass die Gondel-Komponenten baustellenseitig oder in vernachlässigbar geringer Entfernung des Anlagen-Standortes überwiegend von Menschenhand zerlegt und entsprechenden Materialströmen zugeordnet werden. Auch das Altöl wird abgelassen und recycelt. Dazu kommen diverse mechanische und elektrische Werkzeuge zum Einsatz, deren Energieverbrauch in dieser Diplomarbeit als vernachlässigbar angesehen werden. Die entsprechenden Prozesse wurden bereits in Kapitel 5.3.1 definiert und finden hier Anwendung, Tabelle 7.15 verknüpft diese Prozesse mit den zugehörigen ecoinvent-Aktivitäten.

Das Recycling der sortenreinen Materialströme wird anhand der in Anhang 7.7 beschriebenen Recycling-Methoden durchgeführt. Alle zugehörigen relevanten Prozesse und ecoinvent-Aktivitäten sind in Tabelle 7.15 dargestellt.

Szenario 5.4 – Recycling des Rotors

Zuerst wird der Rotor mit einem Kran demontiert und am Boden für die weitere Zerkleinerung platziert. Es wird angenommen, dass im Zuge der baustellenseitigen Zertrennung der Rotorblätter mit Diamantkreissägen, CFK und GFK vom Montage-Personal zunächst mit unterschiedlichen Detektoren identifiziert und anschließend mit hydraulischen Keilen und Werkzeugen voneinander getrennt und sortenrein abtransportiert werden. Dieser Prozess der Zerkleinerung mit einer Diamantkreissäge ist zu Beginn von Kapitel 5.3.1 beschrieben und die Aufwendungen

werden für das Recycling des Rotors übernommen, wobei hier alle drei Rotorblätter zersägt werden. Darin wurde festgehalten, dass beim Zerschneiden eines Rotorblattes der Vestas V90 56,7 l Diesel mit einem Energieinhalt von 36 MJ/l (Röck et al., 2023) im Bagger verbraucht werden. Daher wird der ecoinvent-Prozess *‘diesel, burned in building machine (GLO)’* (ecoinvent Association, 2024) mit insgesamt 6 123,6 MJ berücksichtigt. Weiters wird angenommen, dass auch Metalle bereits vor Ort von Faserverbund-Kunststoffen und anderen Materialien befreit wurden. Diese Prozesse gelten aus Umweltperspektive als vernachlässigbar, sie sind zwar personell aufwendig, aber die energetischen und stofflichen Aufbringungen bleiben gering. Schwache GFK-Verunreinigungen bei der Pyrolyse von CFK sind in der Regel unproblematisch, dennoch wird angenommen, dass die Materialien vollständig voneinander getrennt werden (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Für die vermiedene Herstellung von Karbonfasern wird die in Szenario 1.4 beschriebene Modellierung mit allen Subprozessen bei der Herstellung erneut auf die 1 084 kg im Rotor vorkommender Karbonfasern angewendet. Dabei werden wie zu Beginn von Kapitel 5.3.6 beschrieben nur 95 % der mit der Pyrolyse recycelten Karbonfasern wiederverwendet.

Alle weiteren Schritte des Recyclings der verschiedenen Materialien des Rotors sind ebenfalls zu Beginn von Kapitel 5.3.6 beschrieben und finden in Tabelle 7.16 Anwendung.

Szenario 6.4 – Recover des Rotors

Der Rotor ist die einzige Komponente der Vestas V90, der für eine Verwertung infrage kommt (vgl. Kapitel 2.2.4). Trotzdem können nicht alle Materialien, insbesondere Stahl, Gusseisen und Kupfer, verwertet werden. Um alle vorkommenden Materialien vollständig zu berücksichtigen, wird angenommen, dass diese Metalle wie bereits in Szenario 5.4 auch beim Recover des Rotors entsprechend recycelt werden. Ganz allgemein sind Szenario 5.4 und Szenario 6.4 für die meisten Schritte und Materialien ident, nur das CFK, GFK sowie die Polymerabfälle werden anders behandelt und verwertet, anstatt recycelt zu werden. Das hat Einfluss auf die Transporte, die Entsorgung sowie die Outputs dieser Materialien. Die Prozesse für die Verwertung der jeweiligen Materialien sind in Kapitel 7.7 beschrieben.

Alle weiteren Schritte der thermischen Verwertung der verschiedenen Materialien des Rotors sind ebenfalls in Anhang 7.7 beschrieben und finden in Tabelle 7.17 Anwendung.

5.4 Durchführung des Life Cycle Impact Assessments (LCIA) und Interpretation der Ergebnisse

Nun werden die in der Bestandsanalyse (LCI) gesammelten Informationen in Umweltauswirkungen übersetzt, dafür wird das in Kapitel 4.3.1 beschriebene und von der ISO 14040 (ISO, 2006a) sowie der ISO 14044 (ISO, 2006b) vorgegebene methodische Vorgehen genutzt. Die Auswahl der hierfür verwendeten Einflusskategorien bzw. der Berechnungsmethode wird bereits in Kapitel 5.1 getroffen, diese sind das Global Warming Potential (GWP), das Acidification Potential (AP), das Eutrophication Potential und die Photochemical Oxidant Formation (POF) bzw. die CML v4.8 2016 Impact Assessment Methode.

5.4.1 Folgenabschätzung des LCIA

Führt man nun die in Lebenszyklusanalysen anhand der in den Kapiteln 5.1–5.3 gesammelten Daten, Entscheidungen, Annahmen und Methoden für die gewählten Einflusskategorien durch, so resultieren die Ergebnisse in Tabelle 5.5. Negative Werte stehen für vermiedene Umweltwirkungen (Gutschriften), positive für Belastungen. Die Umweltauswirkungen wurden mittels der ActivityBrowser v3.0.0 (Brightway2 User-Interface) Software und der ecoinvent v3.11 Cut-off Datenbank (vgl. Kapitel 4.3.2) ausgewertet. Die vollständige Auswertung aller Einzelprozesse aus dem LCI und deren Einzel-Umwelteinflüssen sowie das Aufsummieren dieser zu Gesamt-Umwelteinflüssen der definierten Szenarien ist im Anhang 7.8 dargestellt.

Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.4 zeigen die Ergebnisse des LCIA der verschiedenen zirkulären EoL-Strategien nach Systemkomponenten der Vestas V90. Es werden dabei unter Beibehaltung der Vorzeichen der Ergebnisse aus Tabelle 5.5 die jeweils betragsmäßig höchsten Ergebnisse für jede Systemkomponente der Vestas V90 in der jeweiligen Einflusskategorie als Referenzwert von 100 % (schlechtestes Ergebnis) bzw. -100 % (bestes Ergebnis) normalisiert, wobei 0 % in diesem Zusammenhang bedeutet, dass keine Umweltauswirkungen (weder positiv noch negativ) entstehen. Alle verbleibenden Ergebnisse sind in Relation dazu dargestellt. Dies ermöglicht einen Vergleich der Umweltauswirkungen der angewandten EoL-Strategien für gleiche Systemkomponenten.

Auffällig ist, dass die Balken der EoL-Strategien der Lebensdauererweiterung, Reuse und Repower in Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.4 ähnlich groß sind. Dies ist dadurch bedingt, dass diese wie in Anhang 7.8 ersichtlich die Ergebnisse durch die Einflüsse eines einzigen ecoinvent-Prozesses dominiert werden, nämlich der Vermeidung der Produktion elektrischer Energie. In allen Szenarien der erweiterten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) und in allen Einflusskategorien (GWP,

AP, EP, POF) trägt die vermiedene Energieproduktion betragsmäßig zumindest zu 90,7 % der Umwelteinflüsse bei (siehe Anhang 7.8).

Die Lebensdauererweiterung und Reuse unterscheiden sich für alle Systemkomponenten der Vestas V90 in jeder Einflusskategorie unerheblich (weniger als 0,13 %) voneinander. Dies bedeutet, dass die für die Wiederverwendung hinzukommenden Prozesse (weitere Transport- und Montageaufwände) im Vergleich zur Lebensdauererweiterung geringe Beiträge zum Gesamtergebnis liefern.

Tabelle 5.5: LCIA aller betrachteten Szenarien in den vier Einflusskategorien

Szenario	GWP	AP	EP	POF
	[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Ethylen-Äq]
1.1 Lebensdauererweiterung des Fundaments	-1 866 156	-4 662	-6 723	-319
1.2 Lebensdauererweiterung des Turms	-4 328 974	-10 814	-15 596	-741
1.3 Lebensdauererweiterung der Gondel	-3 319 378	-8 240	-12 080	-565
1.4 Lebensdauererweiterung des Rotors	-3 168 946	-7 910	-11 417	-542
2.2 Reuse des Turms	-4 323 526	-10 803	-15 591	-740
2.3 Reuse der Gondel	-3 316 902	-8 235	-12 078	-565
2.4 Reuse des Rotors	-3 167 532	-7 907	-11 416	-541
3.1 Repower des Fundaments	-2 006 126	-5 011	-7 227	-343
3.2 Repower des Turms	-4 653 668	-11 625	-16 765	-796
3.3 Repower der Gondel	-3 568 850	-8 863	-12 979	-608
3.4 Repower des Rotors	-3 271 200	-8 072	-11 795	-553
4.4 Repurpose des Rotors	-30 627	-87	-70	-15
5.1 Recycling des Fundaments	2 574	97	-161	-5
5.2 Recycling des Turms	-252 694	-864	-837	-124
5.3 Recycling der Gondel	-151 681	-815	-976	-66
5.4 Recycling des Rotors	-100 892	-302	-307	-28
6.4 Recover des Rotors	-34 214	-57	-62	-12

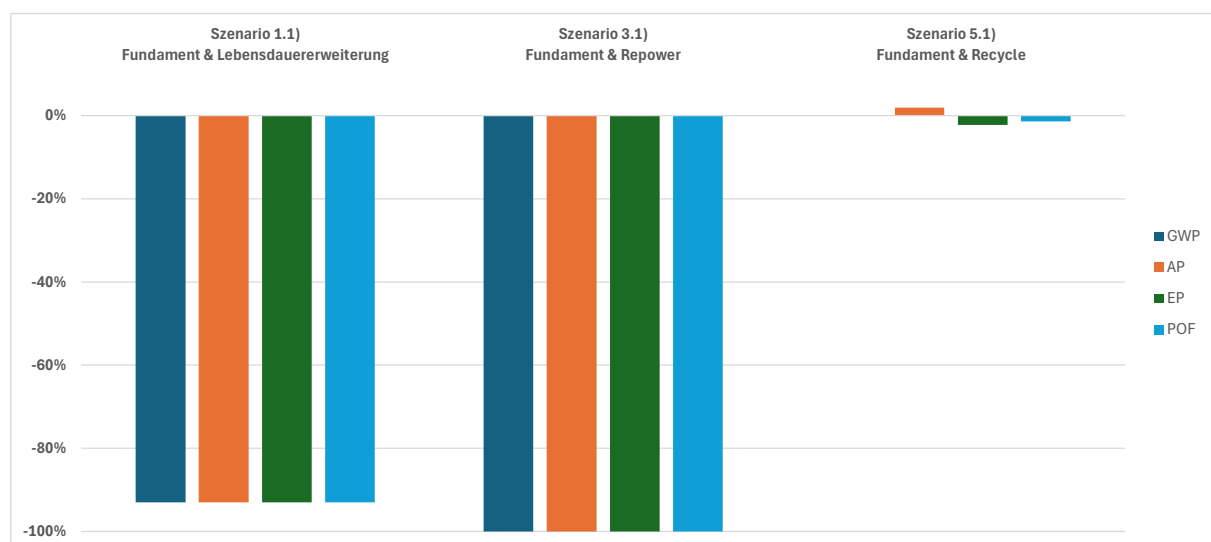


Abbildung 5.1: Relative Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien für das Fundament einer Vestas V90 Windkraftanlage (normalisiert auf -100 % = günstigstes Szenario)

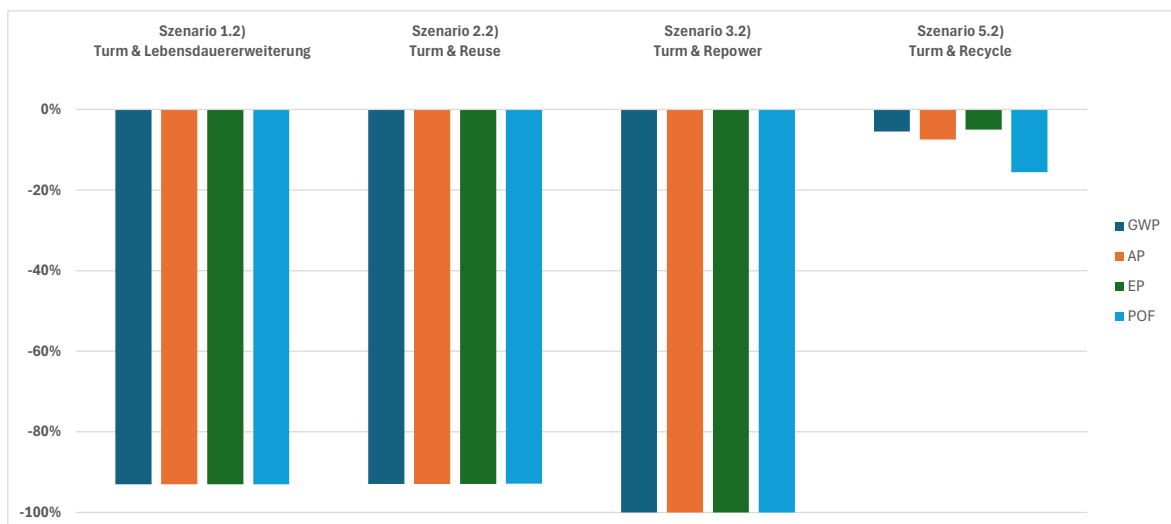


Abbildung 5.2: Relative Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien für den Turm einer Vestas V90 Windkraftanlage (normalisiert auf -100 % = günstigstes Szenario)

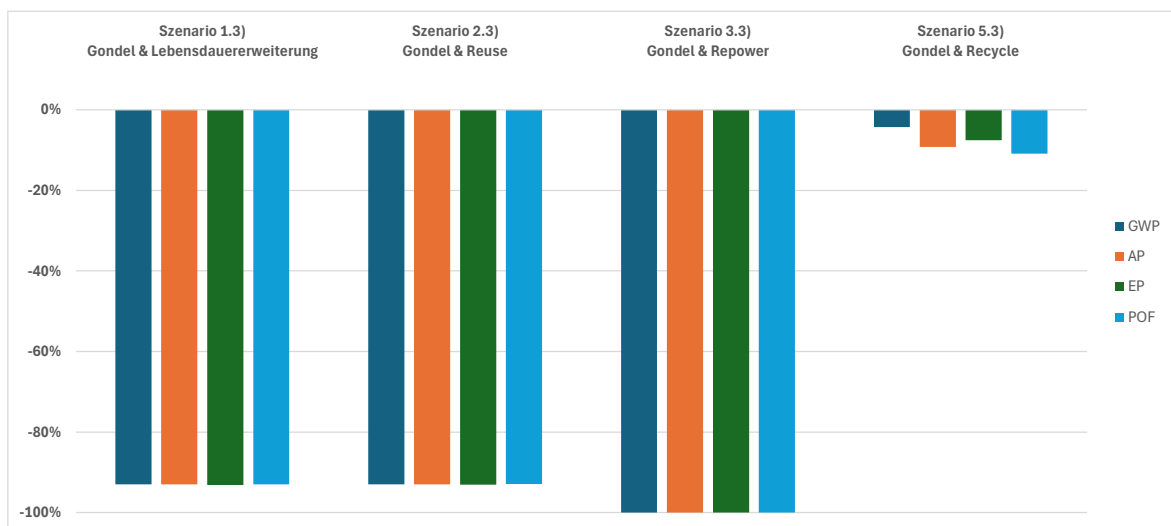


Abbildung 5.3: Relative Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien für die Gondel einer Vestas V90 Windkraftanlage (normalisiert auf -100 % = günstigstes Szenario)

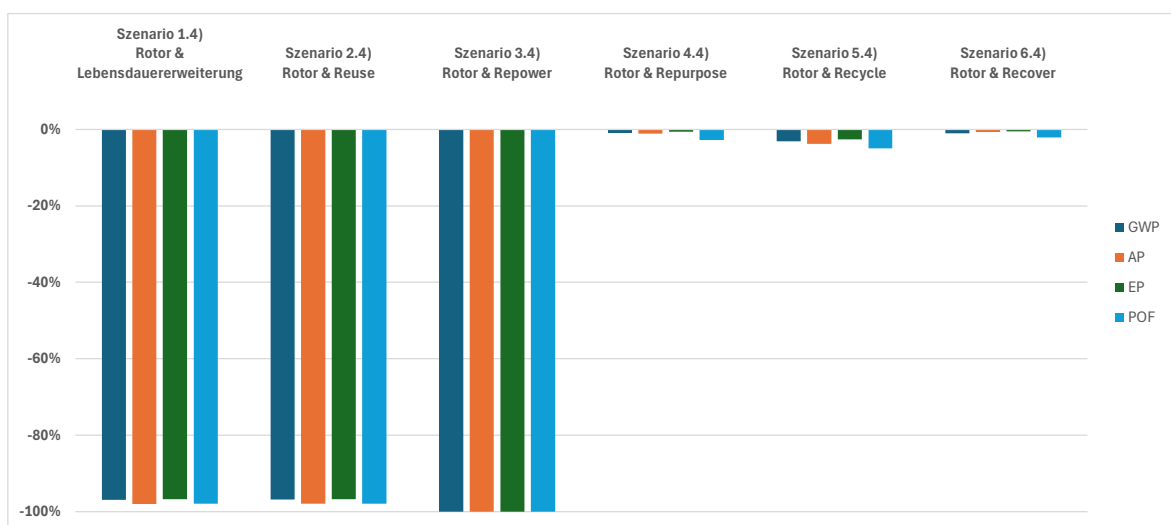


Abbildung 5.4: Relative Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien für den Rotor einer Vestas V90 Windkraftanlage (normalisiert auf -100 % = günstigstes Szenario)

Für die Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien des Fundaments einer Vestas V90 Windkraftanlage zeigen die durchgeführten Lebenszyklusanalysen, dass Repowering des Fundaments in allen Einflusskategorien den größten Nutzen erzeugt. Dieser ist sogar etwas höher als bei der Lebensdauererweiterung des Fundaments, da wie in Kapitel 5.3.4 beschrieben beim Repowering 7,5 % mehr elektrische Energie vermieden wird. Das Recycling des Fundaments stellt das einzige Szenario dar, in dem das GWP und AP ein positives Vorzeichen und somit negative Umweltauswirkungen haben.

Wie in Abbildung 5.2 ersichtlich zeigen alle EoL-Strategien für den Turm in allen Einflusskategorien positive Umwelteinflüsse. Dabei bewirkt Repowering auch hier den größten Umweltnutzen, geringfügig mehr als die Lebensdauererweiterung und Reuse. Beim Recycling der Turm-Materialien entstehen in allen Einflusskategorien mehr als 71 % des Umweltnutzen (vgl. Anhang 7.8) aus der Vermeidung der Erzeugung von niedrig legiertem Stahl. Diese stammen aus dem Recycling des Stahls (vgl. Anhang 7.7). Szenario 5.3 (Recycling des Turms) bestätigt die Wichtigkeit und Effizienz von Stahl-Recycling.

Auch für die EoL-Strategien der Gondel weist Repower vor der Lebensdauererweiterung und Reuse den größten Umweltnutzen in allen Einflusskategorien auf (vgl. Abbildung 5.3). Beim Recycling der Gondel (Szenario 5.4) sind ebenfalls vor allem Prozesse im Zusammenhang mit Metallen ausschlaggebend für die Umwelteinflüsse.

Für den Rotor einer Vestas V90 Windkraftanlage resultieren die EoL-Strategien in den in Abbildung 5.4 dargestellt Umwelteinflüssen. Er ist die einzige Systemkomponente, auf die alle sechs EoL-Strategien Anwendung finden. Auch hier entsteht durch Repower in allen Einflusskategorien der höchste Umweltnutzen, gefolgt von der Lebensdauererweiterung und Reuse. Bei den EoL-Strategien der Materialverwertung resultiert der größte Umweltnutzen aus dem Recycling des Rotors (GWP von -100 892 kg CO₂-Äq.) deutlich vor Recover (GWP von -34 214 kg CO₂-Äq.) und Repurpose (GWP von -30 627 kg CO₂-Äq.). Auch in den verbleibenden Einflusskategorien sind für die Materialverwertung des Rotors alle Emissionen negativ.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit Ausnahme des Recyclings des Fundaments alle modellierten Szenarien in allen Einflusskategorien in einem Umweltnutzen (negative Emissionen) resultieren.

5.4.2 Sensitivitätsanalyse des LCIA

Aufgrund mangelnder Daten und wie für Lebenszyklusanalysen üblich mussten in der vorliegenden Diplomarbeit Annahmen getroffen und auf die Datenqualität aus externen Quellen vertraut werden. Diese sind mit Unsicherheiten behaftet, die eine

Sensitivitätsanalyse (vgl. Kapitel 4.3.1) quantifiziert. Diese beginnt mit der Identifikation von Parametern, die einen potenziell weitreichenden Einfluss auf das LCIA-Ergebnis haben. Für eine Sensitivitätsanalyse eignen sich all jene Parameter, die Prozesse mit großen Auswirkungen bzw. mehrere Prozesse in zumindest einem Szenario beeinflussen, dafür wird das LCI aus Kapitel 5.3 genau analysiert und für alle identifizierten Parameter eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei werden die Bandbreiten für realistische Schwankungen (z. B. $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ oder $\pm 50\%$) der jeweiligen Parameter festgelegt. Sofern sich die Schwankungsbreite nicht aus der Literatur ableiten lässt, sind konservative Schätzungen (zumindest $\pm 20\%$) empfohlen (Rosenbaum et al., 2018). Nachstehend werden die wichtigsten Parameter besprochen und deren Schwankungsbreiten definiert.

Lebensdauererweiterung

In den Szenarien der erweiterten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) wird weiterhin elektrische Energie erzeugt, die eine marktübliche Stromerzeugung in Österreich vermeidet und somit ein Umweltnutzen entsteht (vgl. Kapitel 5.1). Die verbleibenden Szenarien der EoL-Strategien Repurpose, Recycle und Recover bleiben davon unbeeinflusst. In allen betroffenen Szenarien (Szenario 1.1–3.4) trägt die Vermeidung dieser Energieproduktion betragsmäßig zu zumindest 90,7 % der Umwelteinflüsse in allen Einflusskategorien (vgl. Anhang 7.8) bei und ist somit die zentrale Stellgröße. Die vermiedene Energieproduktion setzt sich wie im LCI erkennbar (vgl. Kapitel 5.3.2 bis 5.3.4) im Grunde aus zwei Parametern zusammen, der jährlichen Energieproduktion und der Dauer des weiteren Betriebes einer Vestas V90 Windkraftanlage. Daraus berechnet sich die verhinderte Produktion elektrischer Energie, die wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben auf die Anlagenkomponenten verteilt wird. Die jährliche Energieproduktion einer Vestas V90 beruht auf realen Messwerten (vgl. Kapitel 5.2.2) für den gewählten Standort in Poysdorf-Wilfersdorf, weshalb diese Daten als robust angesehen und in der Sensitivitätsanalyse vernachlässigt werden. Die Dauer des erweiterten Betriebes, die in dieser Diplomarbeit mit 10 Jahren definiert wurde, schwankt in der Praxis häufig. Laut Alsaleh & Sattler (2019), Garrett & Rønde (2011) und Scherhauser et al. (2021) sind auch erweiterte Lebensdauern von 5–15 Jahren üblich, weshalb in dieser Diplomarbeit von einer Variation der verlängerten Lebensdauer von $\pm 50\%$ ausgegangen wird.

Ausfallquoten

Weiters wurden die Ausfallquoten wichtiger Komponenten wie der Rotorblätter, des Getriebes und des Generators während einer verlängerten Betriebsdauer aus in Sheng (2013) und Echavarria et al. (2008) angeführten Werten bestimmt, dies ist in Kapitel 5.3.2 beschrieben. Da es sich hierbei um stochastische Ereignisse handelt, sind auch diese mit Unsicherheiten behaftet. Laut Echavarria et al. (2008) und Li et al. (2022) sind Schwankungen bei den Ausfallquoten von $\pm 20\%$ üblich, daher findet

dieser Wert hier ebenfalls Anwendung. Betroffen sind nur Szenarien der erweiterten Lebensdauer, in denen Systemkomponenten getauscht werden.

Transportdistanzen

Üblicherweise wird auch eine Variation der Transportstrecken im Zuge einer Sensitivitätsanalyse durchgeführt (Nagle et al., 2022). Auch in der vorliegenden Diplomarbeit basieren die Transportdaten auf mit Unsicherheiten behafteten externen Quellen (vgl. Kapitel 5.3). In dieser Sensitivitätsanalyse werden alle der in Kapitel 5.3.1 definierten Prozess-Kategorie c *„Transporte“* berücksichtigt. Da die spezifische Literatur ebenfalls keine Aussagen zur Schwankungsbreite von Transportdistanzen macht, wird von ± 50 % ausgegangen.

Energieaufwände bei Montagetätigkeiten

Montage- und Demontageaufwände aller Szenarien wurden durch Energieverbräuche in Kränen sowie Bagger abgebildet und umfassen alle Prozesse der in Kapitel 5.3.1 definierten Prozess-Kategorie a *„Montage und Demontage“*. Diese beinhalten Prozesse wie Hubarbeiten von Kränen, die baustellenseitige Zerkleinerung von Anlagenteilen und Erdbewegungen im Zuge der Abtragung des Fundaments. Auch diese Tätigkeiten sind mit Unsicherheiten der getroffenen Annahmen und Entscheidungen behaftet. Aus der Literatur lässt sich für die Energieaufwände bei den Montagetätigkeiten keine Schwankungsbreite ableiten, weshalb hier ± 50 % gewählt wird.

Materialverwertung

Auch die stoffliche und thermische Verwertung (Recycling und Recover) von Materialien in den beschriebenen Szenarien sind mit Unsicherheiten behaftet, so können die Umweltauswirkungen der Prozesse unter- bzw. überschätzt werden. In dieser Sensitivitätsanalyse werden alle Prozesse der in Kapitel 5.3.1 definierten Prozess-Kategorie d *„Entsorgung“* berücksichtigt. Die Schwankungsbreite wird mit ± 20 % angenommen, da Prozesse im Zusammenhang mit der Materialverwertung ebenfalls Schwankungsbreiten in diesem Bereich aufweisen (Bonou et al., 2016; Cao et al., 2024; Diez-Cañamero & Mendoza, 2023; Sproul et al., 2023).

Berechnung und Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Für die in dieser Diplomarbeit durchgeführten Sensitivitätsanalysen ist die Linearität bei der Umsetzung von LCI- zu LCIA-Daten anhand der Methodik in ISO 14040 (2006) und in ISO 14044 (2006) von zentraler Bedeutung, so führt eine Verdoppelung einer Aktivität zu einer Verdoppelung aller Umweltauswirkungen in den jeweiligen Einflusskategorien (Rosenbaum et al., 2018). Als Basis für die Umsetzung der Sensitivitätsanalysen werden die im LCIA in Kapitel 5.4.1 berechneten Ergebnisse

verwendet. Ausgehend davon werden alle Prozesse identifiziert, die von einer Variation des untersuchten Parameters betroffen sind.

Tabelle 7.18 aus dem Anhang 7.8 zeigt neben den genauen LCIA-Ergebnissen (blauer Tabellenkopf) auch die für die jeweilige Sensitivitätsanalyse relevanten Prozesse (grüner Tabellenkopf), diese sind mit **1** in der jeweiligen Spalte gekennzeichnet. Hat eine Variation des betrachteten Parameters in der Sensitivitätsanalyse hingegen keine Auswirkungen auf den jeweiligen Prozess, so ist die durch eine **0** erkennbar. Der Input und aufgrund der Linearität auch die Umwelteinflüsse dieser Prozesse erhöhen/verringern sich um die definierte Schwankungsbreite. Als letzten Schritt der Sensitivitätsanalyse werden die neuen Ergebnisse aus den einzelnen Prozessen für alle Szenarien aufsummiert und mit den LCIA-Ergebnissen aus Kapitel 5.4.1 verglichen.

Beispielhaft wird die Berechnung für die Sensitivitätsanalyse des Transports in Szenario 2.2 für das GWP vorgeführt. Wie in Tabelle 5.6 (Ausschnitt aus Tabelle 7.18) dargestellt, setzt sich Szenario 2.2 aus insgesamt vier Prozessen mit den zugehörigen ecoinvent-Aktivitäten zusammen. Nur einer dieser vier Prozesse ist von einer Veränderung der Transportdistanzen betroffen. Erhöht man nun die Transportdistanzen mit der zuvor definierten Schwankungsbreite um +50 %, so steigert sich der Eingabewert für den einzelnen Prozess ‚Transport des Turms‘ von 53 280 tkm auf 79 920 tkm und damit auch die LCIA-Ergebnisse in den vier Einflusskategorien um +50 %. Dementsprechend erhöht sich das GWP von 5 389,54 kg CO₂-Äq. auf 8 084,31 kg CO₂-Äq., die weiteren drei Prozesse bleiben hier unverändert. Eine erneute Summenbildung des GWP aus den vier Prozessen resultiert nicht wie im ursprünglichen LCIA in -4 323,5 t CO₂-Äq., sondern nun in -4 320,8 t CO₂-Äq. Das entspricht einer Erhöhung von 0,06 % im GWP von Szenario 2.2 durch eine Steigerung der Transportdistanzen um 50 %. Dieses und alle weiteren Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die verbleibenden Szenarien sind in den Tabellen in Anhang 7.9 gesammelt. Dabei wird immer mit der positiven Schwankungsbreite gerechnet, für die negative Schwankungsbreite sind die Vorzeichen in den Tabellen in Anhang 7.9 zu drehen.

In Tabelle 7.18 im Anhang 7.8 sind die vollständige Auflistung aller LCIA-Ergebnisse sowie die daraus abgeleiteten Daten der Sensitivitätsanalyse (wie in Tabelle 5.6) für alle Szenarien zu finden. Tabelle 7.19 bis Tabelle 7.23 in Anhang 7.9 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse durch Auswertung der Daten in Tabelle 7.18, wobei die Berechnungen wie im zuvor erklärten Beispiel umgesetzt werden.

Tabelle 5.6: LCIA-Ergebnisse und Daten der Sensitivitätsanalyse für Reuse des Turms (Szenario 2.2)

				LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse					
				GWP	AP	EP	POF	Lebens- dauer	Ausfall- quoten	Trans- port	Montage- tätig- keiten	Material- verwert- ung	
Kat.	Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Ethylen-Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%
Szenario 2.2) Turm & Reuse					-4323526,35	-10803,26	-15591,31	-739,60					
a	Montage des Turms	290,38	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	29,07	0,18	0,05	0,01	0	0	0	1	0
a	Demontage des Turms	290,38	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	29,07	0,18	0,05	0,01	0	0	0	1	0
c	Transport des Turms	53280,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	5389,54	10,45	4,18	1,04	0	0	1	0	0
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-18021850,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-4328974,04	-10814,08	-15595,58	-740,67	1	0	0	0	0

Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 veranschaulichen die Veränderung des GWP aller Szenarien durch eine im Rahmen der Sensitivitätsanalyse Erhöhung um die positive Schwankungsbreite. Als Referenz wird dabei immer der dunkelblaue Balken (unverändertes GWP des LCIA) verwendet. Die Anwendung der negativen Schwankungsbreite hätte zur Folge, dass sich der entsprechende Balken um den Referenzwert spiegelt, aber denselben Abstand vom diesem beibehält.

Auffällig bei der Betrachtung von Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 ist, dass eine Variation der meisten Parameter kaum erkennbare Veränderungen im GWP hervorruft.

Davon ausgenommen ist die Veränderung der Lebensdauererweiterung (orange Balken), die wie in Tabelle 7.19 sichtbar in allen Einflusskategorien und in allen Szenarien der verlängerten Lebensdauer zu einer drastischen Verringerung der Umwelteinflüsse um rund 50 % führt. Wie zuvor erwähnt liegt das daran, dass Prozesse im Zusammenhang mit der Lebensdauererweiterung, insbesondere der vermiedenen Produktion elektrischer Energie, in diesen Szenarien die dominanten Prozesse sind (vgl. Anhang 7.8). Eine Steigerung dieser führt zu Erhöhungen in den Ergebnissen in einem ähnlichen Ausmaß. Eine möglichst sorgfältige Definition dieser Prozesse und aller einfließender Parameter ist daher essenziell für die Qualität des LCIA. Die Beeinflussung dieser Parameter durch EntscheidungsträgerInnen stellt somit auch aus Umweltsicht den größten Hebel dar und ist von zentralem Interesse. Wie in Abbildung 5.6 dargestellt ist das Recycling des Fundaments ebenfalls stark von einer Variation der in der Sensitivitätsanalyse betrachteten Parameter betroffen, hier führt insbesondere eine Anwendung der Schwankungsbreiten der Transportdistanzen, der Montageaufwände sowie der Materialverwertung zu starken Veränderungen der Umwelteinflüsse in allen Einflusskategorien. Dies liegt an der großen Masse des Fundaments, das im Zuge der Demontage aufwendig zerkleinert, abgetragen und abtransportiert wird. Weiters sind die in den Tabellen in Anhang 7.9 gesammelten Sensitivitäten für dieses Szenario so hoch, weil die vorkommenden Einzelprozesse sowohl positive wie auch negative Einzelumweltauswirkungen aufweisen, die in Summe in betragsmäßig geringen Gesamt-Umweltauswirkungen des Szenarios resultieren. Daher führen hier bereits geringe Veränderungen der Umwelteinflüsse zu hohen Sensitivitäten in den Ergebnissen.

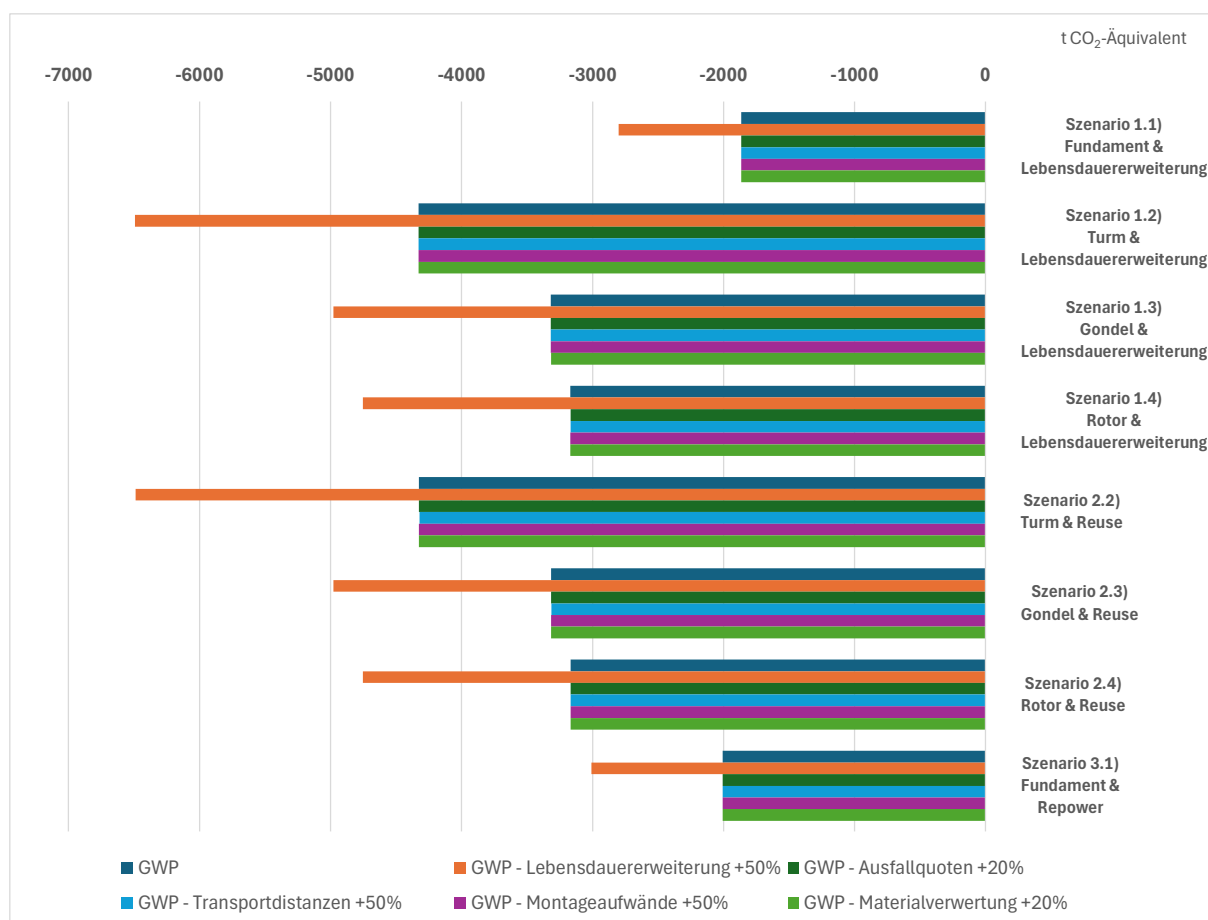


Abbildung 5.5: Sensitivitätsanalyse – Veränderung des GWP in allen Szenarien der verlängerten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower)

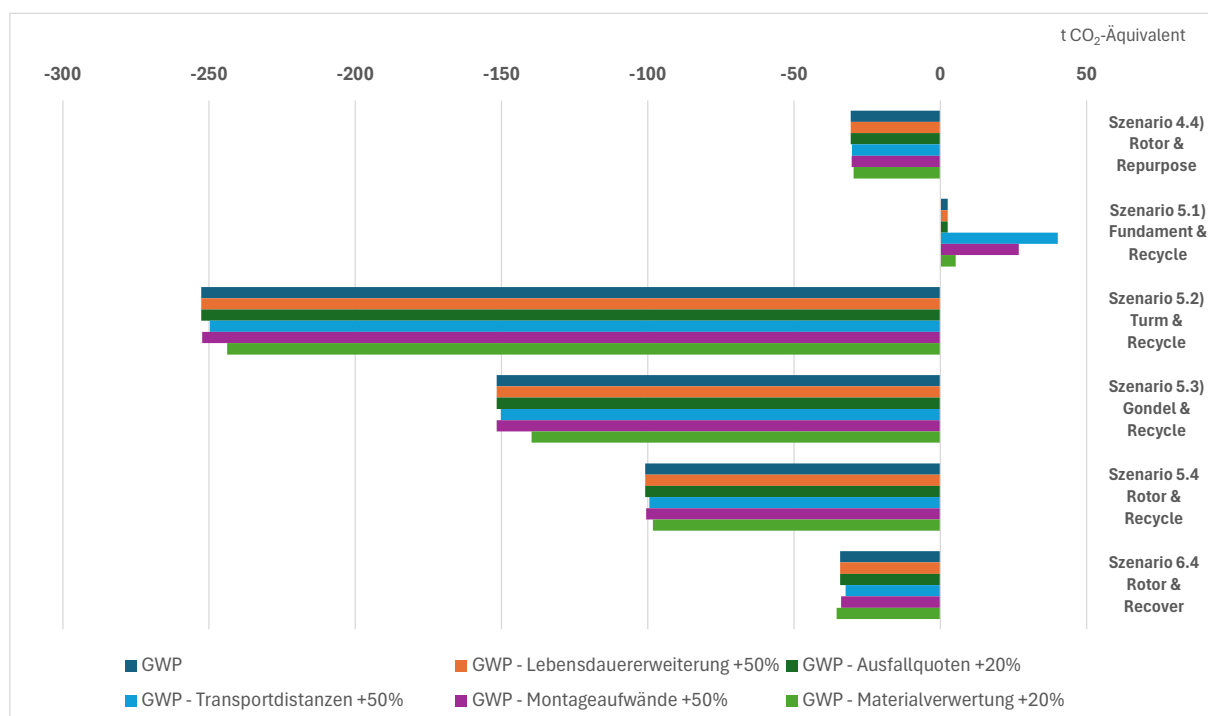


Abbildung 5.6: Sensitivitätsanalyse – Veränderung des GWP in allen Szenarien der Materialverwertung (Repurpose, Recycle, Recover)

5.5 Entwicklung eines Vorschlags zur Simplifizierung

Lebenszyklusanalysen sind in der Regel aufwendig und kompliziert in der Datenbeschaffung und Durchführung, weshalb simplifizierte Ansätze auf besonderes Interesse stoßen. Ziel dieser Diplomarbeit ist ebenfalls die Entwicklung einer simplifizierten Berechnungsmethode, die den Berechnungsaufwand verringern soll. Die Anzahl der im LCI vorkommenden Prozesse ist proportional zum Ressourceneinsatz bei Lebenszyklusanalysen, eine Simplifizierung bedeutet somit eine Verringerung dieser Prozesse (Douziech et al., 2021).

Publikationen zur Standardisierung und Vereinfachung von Lebenszyklusanalysen in der Windkraft beschränken sich wie in der Literaturrecherche ersichtlich (vgl. Kapitel 3) bisher größtenteils auf cradle-to-grave Lebenszyklusanalysen, wobei EoL-Prozesse vernachlässigt oder oft nur am Rande betrachtet werden (Eisl & Schlund, 2024; Mendecka & Lombardi, 2019).

Die Ansätze zur Vereinfachung von Lebenszyklusanalysen sind im Allgemeinen vielfältig, manche ignorieren Prozesse, reduzieren die Anzahl der Einflusskategorien, nutzen vereinfachte bzw. ähnliche Daten oder verwenden große Datenmengen unterschiedlicher Lebenszyklusanalysen, um mithilfe mathematischer Methoden Ähnlichkeitsgesetze abzuleiten. Zwei weitere übliche Vorgehensweisen zur Vereinfachung von Lebenszyklusanalysen, die im Gegensatz zu den bereits genannten Methoden zur Beantwortung der Fragestellung in dieser Diplomarbeit und für die Weiterentwicklung der hier gefundenen Ergebnisse angewendet werden können, sind (Beemsterboer et al., 2020; Douziech et al., 2021; Gradin & Björklund, 2021):

1. die Verringerung der Prozesse im LCI durch Identifikation von Gemeinsamkeiten in den Szenarien und
2. der Ausschluss von Prozessen, die eine geringe Umweltrelevanz aufweisen (Anwendung des Cut-off-Kriteriums nach ISO 14040, 2006)

Die Anzahl der für die Beschreibung benötigten ecoinvent-Prozesse kann in der Gesamtheit aller Szenarien reduziert werden, indem Szenarien-übergreifende Gemeinsamkeiten identifiziert und ausgenutzt werden. Insbesondere an diese Diplomarbeit anschließende Werke und Modelle können von diesen Synergien Gebrauch machen. Kapitel 5.5.1 erläutert den Ablauf zur Identifikation dieser Gemeinsamkeiten und enthält zudem deren Auflistung.

Die ISO 14040 (ISO, 2006a) und ISO 14044 (ISO, 2006b) sind die für Lebenszyklusanalysen zentralen Normenwerke. Sie erlauben die Verwendung eines Cut-off-Kriteriums, das den Ausschluss von Materialien, Energieflüssen oder Prozessen mit geringen Umweltauswirkungen spezifiziert. Eine Anwendung des Cut-off-Kriteriums auf alle Prozesse, die in Summe weniger als 1 % der

Umweltauswirkungen ausmachen, ist in der wissenschaftlichen Literatur üblich und oftmals effizient, sofern diese dem Analysten bekannt sind (Beemsterboer et al., 2020). Eine Vielzahl wissenschaftlicher Publikation sowie die in Kapitel 3 durchgeführte Literaturanalyse bestätigen das GWP branchenübergreifend als die wichtigste und meistverwendete Einflusskategorie in Lebenszyklusanalysen (Portillo et al., 2024). In der vorliegenden Diplomarbeit werden dementsprechend alle LCI-Prozesse (vgl. Kapitel 5.3), die im LCIA (vgl. Kapitel 5.4) in Summe weniger als 1 % zum GWP eines Szenarios beitragen, vernachlässigt. Dadurch kann die Anzahl der notwendigen Prozesse erheblich reduziert werden, ohne die Qualität der Lebenszyklusanalysen für das GWP signifikant zu beeinflussen. Kapitel 5.5.2 beschreibt die Verwendung des Cut-off-Kriteriums.

Die simplifizierte LCA-Berechnungsmethode ergibt sich aus der Verwendung der Gemeinsamkeiten im LCI und der Anwendung des Cut-off-Kriteriums, Kapitel 5.5.3 evaluiert den daraus entstandenen Ansatz.

5.5.1 Identifikation von Gemeinsamkeiten im LCIA

Die Ausnutzung identischer Elemente kann den Berechnungsaufwand von Lebenszyklusanalysen erheblich verringern (Gradin & Björklund, 2021). In diesem Kapitel werden Szenarien-übergreifende Gemeinsamkeiten aus dem LCI in Kapitel 5.3 identifiziert und sichtbar gemacht. Die gefundenen Gemeinsamkeiten haben dabei im Gegensatz zur Anwendung des Cut-off-Kriteriums (vgl. Kapitel 5.5.2) keinen Einfluss auf die Umweltauswirkungen in den vier Einflusskategorien. Sie sollen Redundanzen im Berechnungssystem aufzeigen und dadurch eine Möglichkeit geben, das LCI zu simplifizieren.

Als Gemeinsamkeiten werden in diesem Kapitel Prozessmodule bestehend aus einem oder mehreren Prozessen des LCI definiert, die in zumindest zwei Szenarien identisch auftreten. Dazu werden die exakten LCI-Daten zu den jeweiligen Szenarien aus den Anhängen 7.2–7.6 analysiert. Für eine Gemeinsamkeit ist es nicht ausreichend, bloß denselben ecoinvent-Prozess zu verwenden. Eine weitere notwendige Bedingung ist, dass die quantifizierten Elementarflüsse dieselben Zahlenwerte haben, um wirklich identische Prozesse im LCI darzustellen. Aufgrund der in Kapitel 5.3.1 definierten Struktur der LCIs können Gemeinsamkeiten jeweils in eine der folgenden Kategorien entfallen:

- a. Montage & Demontage,
- b. Herstellung neuer Komponenten,
- c. Transporte,
- d. Entsorgung sowie
- e. Outputs und Avoided Burden.

Es werden schrittweise Szenarien miteinander verglichen, Gemeinsamkeiten erarbeitet und diese zusammengefasst. Hierbei wird eine Nomenklatur eingeführt, die jeden identifizierten Zusammenhang einer Abkürzung zuordnet, demnach wird Gemeinsamkeit 1 in der Kategorie b mit Gb1 abgekürzt. Gemeinsamkeiten dieser Art können somit in verschiedenen Szenarien nur für gleiche Komponenten und Kategorien in unterschiedlichen EoL-Strategien auftreten. Alle identifizierten Gemeinsamkeiten (Prozessmodule) sind in Tabelle 7.24 (vgl. Anhang 7.10) gekennzeichnet. Tabelle 5.7 gibt einen Überblick, in welchen Szenarien die identifizierten Gemeinsamkeiten auftreten, und macht Aussagen über das Reduktionspotenzial mehrfach auftretende Prozesse und Prozessmodule. Sie veranschaulicht, auf welche Szenarien die identifizierten Gemeinsamkeiten zutreffen, wie viele Prozesse im gesamten LCI betroffen sind und verdeutlicht das Potential, diese zu verringern.

Es ist erkennbar, dass insgesamt sechs Gemeinsamkeiten durch ähnliche Montage- und Demontageprozesse modelliert werden können. Beispielsweise sind die Montage und Demontage der Ersatzteile der Gondel mit einem Kran in allen Szenarien der erweiterten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) identisch (vgl. Ga2), Analoges gilt für die verbleibenden Systemkomponenten. Weiters ist die Zerkleinerung der Rotorblätter in allen Szenarien der Materialverwertung (Repurpose, Recycle, Recover) gleich modelliert (vgl. Ga6). Die Gemeinsamkeiten in dieser Kategorie betreffen jedoch eine geringe Anzahl an Prozessen.

Die Herstellung neuer Komponenten ist nur für Szenarien relevant, in denen Ersatzteile benötigt werden. Bei der Gondel ist dies für alle Szenarien der erweiterten Lebensdauer der Fall (vgl. Gb1). Für den Rotor trifft dies nur für die Lebensdauererweiterung und Reuse zu (vgl. Gb2), da beim Repowering werksneue vergrößerte Rotorblätter zum Einsatz kommen. In den genannten Fällen gibt es große Überschneidungen, die eine Vielzahl an Prozessen involviert.

Die Gemeinsamkeiten in der Transport-Kategorie sind insbesondere in den Szenarien der erweiterten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) durch identische Distanzen von Ersatzteilen, des Wartungsteams sowie dem mit der Materialverwertung defekter Bauteile verbundenen Abtransporten geschuldet (vgl. Gc1 und Gc2).

Alle Prozesse der Entsorgung der Gondel sind für die Lebensdauererweiterung, Reuse und Repower identisch (vgl. Gd1), für die Entsorgung des Rotors gilt dies nur für die Lebensdauererweiterung und Reuse (vgl. Gd2). Weiters gibt es eine Vielzahl gemeinsamer Prozesse bei der Entsorgung des Rotors im Zuge von Repower und Recycle.

Tabelle 5.7 Gemeinsamkeiten der verschiedenen Szenarien und betroffene Prozesse

	1.1 Lebensdauererweiterung des Fundaments	1.2 Lebensdauererweiterung des Turms	1.3 Lebensdauererweiterung der Gondel	1.4 Lebensdauererweiterung des Rotors	2.2 Reuse des Turms	2.3 Reuse der Gondel	2.4 Reuse des Rotors	3.1 Repower des Fundaments	3.2 Repower des Turms	3.3 Repower der Gondel	3.4 Repower des Rotors	4.4 Repurpose des Rotors	5.1 Recycling des Fundaments	5.2 Recycling des Turms	5.3 Recycling der Gondel	5.4 Recycling des Rotors	6.4 Recover des Rotors	Anzahl der Prozesse im vollständigen LCIA	Anzahl der zur Beschreibung notwendige Prozesse
a. Montage und Demontage																			
Ga1		•												•				3	1
Ga2			•			•				•								6	1
Ga3						•									•			3	1
Ga4				•			•											6	2
Ga5							•					•					•	6	2
Ga6											•	•					•	4	1
b. Herstellung neuer Komponenten																			
Gb1			•			•				•								12	4
Gb2				•			•											24	12
c. Transporte																			
Gc1			•			•				•								27	9
Gc2				•			•											20	10
Gc3				•			•				•							3	1
Gc4											•	•						2	1
Gc5											•					•	•	6	2
Gc6											•					•		6	3
Gc7												•				•	•	3	1
d. Entsorgung																			
Gd1			•			•				•								21	7
Gd2				•			•											22	11
Gd3											•					•	•	12	4
Gd4											•					•		14	7
Gd5												•				•	•	3	1
e. Outputs und Avoided Burden																			
Ge1		•			•													2	1
Ge2			•			•												2	1
Ge3			•			•				•								12	4
Ge4				•			•											28	14
Ge5											•					•	•	6	2
Ge6											•					•		16	8
Ge7												•				•	•	3	1
Gesamt																		272	112

Bei den Outputs und Avoided Burdens sind ebenfalls ein Großteil der Prozesse in den Szenarien der erweiterten Lebensdauer gleich (vgl. Ge1, Ge2, Ge3, G4). Diese Prozesse hängen eng mit jenen aus der vorangegangenen Kategorie der Entsorgung zusammen.

Zusammenfassend wird deutlich, dass eine Vielzahl der Gemeinsamkeiten durch die Ähnlichkeiten der Lebensdauererweiterung, Reuse und Repower begründet sind, unabhängig von der Komponente der Vestas V90 (vgl. Ga2, Ga4, Gb1, Gb2, Gc1, Gc2, Gc3, Gd1, Gd2, Ge1, Ge2, Ge3 und Ge4). Alle Prozesse der Lebensdauererweiterung (darunter Wartungs- und Reparaturaufwände wie der Einsatz von Kränen, Materialrecycling und -verwertung durch Ersatzteile, Transporte im Zusammenhang mit Wartung und Reparatur, Outputs und durch Materialrecycling und -verwertung von Ersatzteilen entstandene Avoided Burden) werden für die jeweilige Systemkomponente auch im Reuse-Szenario übernommen, wobei hier weitere Prozesse wie die Demontage und die erneute Montage der Windkraftanlage mit einem Kran sowie dem Transport der Windkraftanlage zum neuen Standort hinzukommen. Betrachtet man die visuellen Muster in Tabelle 5.7, so werden genau diese wiederholten Zusammenhänge erkennbar.

Aus den identifizierten Gemeinsamkeiten ergibt sich, dass insgesamt 272 Prozesse mehrfach vorkommen und diese auf 112 Prozesse reduzierbar sind. Im gesamten LCI und LCIA für alle Szenarien wurden 375 Prozesse verwendet, die vollständigen Ergebnisse des LCIA sind somit ohne Informationsverluste durch 215 Prozessen beschreibbar. Die simplifizierte Methode macht davon Gebrauch, indem sie mehrfach vorkommende LCI-Prozesse nur einmal in LCIA-Ergebnisse auswertet und die Ergebnisse daraus auf identische Blöcke überträgt.

5.5.2 Cut-off von Prozessen der Lebenszyklusanalysen

Unabhängig von den identifizierten Gemeinsamkeiten wird das 1 % Cut-off-Kriterium der ISO 14040 (ISO, 2006a) und ISO 14044 (ISO, 2006b) auf die Ergebnisse des LCIA aus Kapitel 5.4 angewandt. Dabei werden in jedem Szenario die Ergebnisse in der Einflusskategorie des GWP der einzelnen Prozesse analysiert und, sofern diese einen dem Betrag nach kumuliertem Gesamt-Umwelteinfluss auf das GWP des entsprechenden Szenarios von weniger als 1 % haben, vernachlässigt. Unter kumulierte Beträge wird verstanden, dass die Einzelergebnisse des LCIA (vgl. Kapitel 5.4) in der jeweiligen Einflusskategorie der Prozesse innerhalb eines Szenarios zunächst in Beträge umgewandelt werden und dann für das jeweilige Szenario aufsummiert werden. Der Einfluss eines einzelnen Prozesses auf den kumulierten Gesamteinfluss nach Beträgen ergibt sich aus dem anteilmäßigen Vergleich dieser beiden Zahlenwerte.

Es werden zunächst die LCIA-Ergebnisse aus Kapitel 5.4 aller Einzelprozesse in deren Beträge umgerechnet, um in einen weiteren Schritt die betragsmäßigen Anteile der Einzelprozesse zum gesamten GWP in den Szenarien zu bestimmen. Die Beträge sind in Tabelle 7.24 im Anhang 7.10 mit dem gelben (LCIA-Ergebnisse Beträge) und die betragsmäßigen Anteile mit dem orangen (LCIA-Ergebnisse Relativ) Tabellenkopf gekennzeichnet. Dunkelorange markierte Zahlenwerte in den Spalten der LCIA-Ergebnisse in Tabelle 7.24 markieren all jene Prozesse, die in der entsprechenden Einflusskategorie im jeweiligen Szenario durch Anwendung des Cut-off-Kriteriums insgesamt weniger als 1 % ausmachen. Die betragsmäßigen Anteile von beibehaltenen Prozessen (zumindest 99 % des betragsmäßigen GWP eines Szenarios), wurden in die Spalten unter dem lila Tabellenkopf übernommen und für jedes Szenario erneut aufsummiert. Daraus ergeben sich das GWP sowie die Umweltauswirkungen in den verbleibenden Einflusskategorien nach Anwendung des Cut-off-Kriteriums auf die LCIA-Ergebnisse einzeln und für die Szenarien aggregiert.

Das Ergebnis dieses Ansatzes ist in Tabelle 5.8 dargestellt, für jedes Szenario ist die Anzahl der Prozesse im LCI angegeben. Durch Anwendung des zuvor beschriebenen Vorgehens verringert sich die Anzahl der Prozesse insgesamt deutlich von 375 auf 91, was einer Reduktion von 75,7 % entspricht. Szenarien wie 1.3, 1.4, 2.3, 2.4 und 3.3 zeigen sogar eine Verringerung der Anzahl der Prozesse von zumindest 92,6 %. Hier sind ein bis zwei Prozesse für mehr als 99 % des GWP verantwortlich. In einigen Szenarien, darunter 1.1, 1.2, 3.1 und 3.2, kann die Anzahl der Prozesse nicht verringert werden, da diese nur mit einem einzigen Prozess modelliert wurden. In allen verbleibenden Szenarien kann die Anzahl der Prozesse durch die Verwendung des Cut-off-Kriteriums ebenfalls erheblich reduziert werden (Reduktion 38,2–74,5 %). Szenarien, die durch eine Vielzahl an Prozessen beschrieben werden, zeigen die größten Effizienzgewinne (Reduktion der Prozesse) durch Anwendung des simplifizierten Vorschlags. Die rechte Spalte in Tabelle 5.8 zeigt das Verhältnis aus dem GWP der simplifizierten Methode und dem GWP der vollständigen LCIA-Ergebnisse für alle Szenarien.

5.5.3 Evaluierung der simplifizierten Methode

Durch die Ausnutzung den Gemeinsamkeiten (vgl. Kapitel 5.5.1) und der Anwendung des Cut-off-Kriteriums (vgl. Kapitel 5.5.2) wurde ein Vorschlag zur Simplifizierung der Ökobilanzierung von zirkulären EoL-Strategien von Windkraftanlagen anhand der Vestas V90 entwickelt. Beide tragen dazu bei, die Anzahl der Prozesse im LCI zu reduzieren und damit den Gesamtaufwand zu verringern. Das gesamte LCI aller Szenarien setzt sich aus 375 Einzelprozessen zusammen. Allein die Ausnutzung der Gemeinsamkeiten kann diese auf 215 Prozesse reduzieren. Eine isolierte Anwendung des Cut-off-Kriteriums verringert diese 375 Prozesse auf 91 Prozesse. Durch die

Tabelle 5.8 Anzahl der Prozesse in den Szenarien vor und nach Anwendung des Cut-off-Kriteriums von 1 %

Szenario	Prozesse Gesamt	Prozesse nach Cut-Off	GWP Genauigkeit durch simplifizierte Methode*
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung	1	1	100,00%
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung	1	1	100,00%
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung	27	2	99,02%
Szenario 1.4) Rotor & Lebensdauererweiterung	51	1	99,43%
Szenario 2.2) Turm & Reuse	4	1	99,87%
Szenario 2.3) Gondel & Reuse	30	2	99,01%
Szenario 2.4) Rotor & Reuse	54	1	99,38%
Szenario 3.1) Fundament & Repower	1	1	100,00%
Szenario 3.2) Turm & Repower	1	1	100,00%
Szenario 3.3) Gondel & Repower	27	2	99,09%
Szenario 3.4) Rotor & Repower	51	13	99,06%
Szenario 4.4) Rotor & Repurpose	13	7	99,50%
Szenario 5.1) Fundament & Recycle	18	6	99,24%
Szenario 5.2) Turm & Recycle	11	4	99,19%
Szenario 5.3) Gondel & Recycle	27	13	99,03%
Szenario 5.4) Rotor & Recycle	34	21	99,16%
Szenario 6.4) Rotor & Recover	24	14	99,04%

*Beschreibt das Ergebnis der jeweiligen Einflusskategorie der simplifizierten Methode im Verhältnis zum Ergebnis der jeweiligen Einflusskategorie der vollständigen LCIA-Ergebnisse

Kombination beider Ansätze ist eine Reduktion auf 70 Prozesse möglich, wodurch 81,3 % der Prozess im LCI entfallen (vgl. Tabelle 7.24 in Anhang 7.10).

Da es sich bei der hier entwickelten simplifizierten Methode um einen neuartigen Ansatz handelt, ist ein direkter Vergleich mit bestehender Literatur nicht möglich. Die Literaturanalyse (vgl. Kapitel 3) zeigte, dass bislang keine Publikationen mit hinreichender inhaltlicher Nähe vorliegen. Einerseits liegt das an Unterschieden in den gewählten Systemgrenzen, dem Scope (gate-to-gate anstatt cradle-to-grave), der verwendeten Methodik, den Daten sowie den getroffenen Annahmen. Andererseits ist es dadurch begründet, dass die dort durchgeführten Lebenszyklusanalysen auf eine Quantifizierung der Umweltauswirkungen abzielen, nicht auf die Vereinfachung der EoL-Bewertung. Neben dem Global Warming Potential sind drei weitere Einflusskategorien von Bedeutung (vgl. Kapitel 4.3). Das AP, das EP und die POF werden nun verwendet, um die anhand des Global Warming Potentials entwickelte simplifizierte Methode zu evaluieren. Die im simplifizierten Modell übrig gebliebenen Prozessen können, wie in Tabelle 7.24 in Anhang 7.10 unter dem lila Tabellenkopf dargestellt, auch für die verbleibenden Einflusskategorien ausgewertet werden. Dadurch erhält man die LCIA-Ergebnisse der simplifizierten Methode für alle Einflusskategorien.

Bildet man nun das Verhältnis aus den LCIA-Ergebnissen der simplifizierten Berechnungsmethode mit den umfassenden LCIA-Ergebnissen aus Kapitel 5.4 für alle Einflusskategorien in allen Szenarien, so entstehen daraus die in Tabelle 5.9

dargestellten Verhältnisse. Diese sind in relativen Werten dargestellt und sind ein Maß für die Genauigkeit des simplifizierten Berechnungsverfahrens. Es ist ersichtlich, dass die simplifizierte Methode in allen Szenarien sowie in allen Einflusskategorien die Ergebnisse des LCIA bis auf eine Ausnahme mit einer Übereinstimmung von zumindest 96,51 % reproduziert. Bildet man das arithmetische Mittel der Evaluierung in den verbleibenden Einflusskategorien (AP, EP, POF ohne GWP), so ergibt sich eine durchschnittliche Übereinstimmung von 98,82 %. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass die simplifizierte Methode die Umwelteinflüsse mit geringer Abweichung reproduziert und den Gesamtaufwand deutlich verringert.

Tabelle 5.9: Vergleich der LCIA-Ergebnisse der simplifizierten Methode mit den vollständigen LCIA-Ergebnissen nach Beträgen

Szenario	GWP Genauigkeit durch simplifizierte Methode*	AP Genauigkeit durch simplifizierte Methode*	EP Genauigkeit durch simplifizierte Methode*	POF Genauigkeit durch simplifizierte Methode*
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung	99,02%	97,30%	98,11%	97,41%
Szenario 1.4) Rotor & Lebensdauererweiterung	99,43%	99,26%	99,48%	99,27%
Szenario 2.2) Turm & Reuse	99,87%	99,90%	99,97%	99,86%
Szenario 2.3) Gondel & Reuse	99,01%	97,34%	98,11%	97,45%
Szenario 2.4) Rotor & Reuse	99,38%	99,22%	99,47%	99,22%
Szenario 3.1) Fundament & Repower	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Szenario 3.2) Turm & Repower	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Szenario 3.3) Gondel & Repower	99,09%	97,48%	98,24%	97,58%
Szenario 3.4) Rotor & Repower	99,06%	98,66%	99,14%	98,39%
Szenario 4.4) Rotor & Repurpose	99,50%	99,25%	99,41%	99,61%
Szenario 5.1) Fundament & Recycle	99,24%	98,93%	97,10%	99,25%
Szenario 5.2) Turm & Recycle	99,19%	96,86%	93,20%	98,61%
Szenario 5.3) Gondel & Recycle	99,03%	99,34%	99,70%	99,23%
Szenario 5.4) Rotor & Recycle	99,16%	98,38%	97,87%	98,80%
Szenario 6.4) Rotor & Recover	99,04%	96,51%	98,24%	98,50%
*Beschreibt das Ergebnis der jeweiligen Einflusskategorie der simplifizierten Methode im Verhältnis zum Ergebnis der jeweiligen Einflusskategorie der vollständigen LCIA-Ergebnisse				

6 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Diplomarbeit beschrieben, in einen umfassenden Kontext betrachtet, Einschränkungen der gefundenen Ansätze dargelegt sowie ein Ausblick für anknüpfende Werke erörtert.

6.1 Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen

In Kapitel 1.2 der Einleitung sind vier Forschungsfragen definiert, die Struktur der vorliegenden Arbeit sowie die zielgerichtete Wahl der Methoden (vgl. Kapitel 4) wurden zur Beantwortung dieser festgelegt.

Kapitel 3 beantwortet Forschungsfrage 2 *„Was ist der aktuelle Stand der Forschung der Ökobilanzierung von End-of-Life-Strategien in der Windindustrie?“*. Im Zuge der durchgeführten Literaturanalyse wurde der aktuelle Forschungsstand dargelegt sowie Lücken des Forschungsfeldes identifiziert und beschrieben. Aus dieser initialen Analyse geht hervor, dass sich Lebenszyklusanalysen von Windkraftanlagen meist auf ganze Anlagen (anstatt der Systemkomponenten) sowie den gesamten Lebenszyklus beziehen. EoL-Betrachtungen finden hier häufig nur am Rande statt. Eine Vielzahl der inkludierten Literatur befasst sich dabei mit Recycling, Recover und der Deponierung von Windkraftanlagen, für die Strategien der Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower und Repurpose konnten nur einzelne Werke identifiziert werden. Die 23 in der SLR inkludierten Lebenszyklusanalysen unterscheiden sich im methodischen Vorgehen, in den getroffenen Annahmen, Entscheidungen, Datenquellen und Datenbanken, in den Einflusskategorien, in ihren Systemgrenzen und den betrachteten Windkraftanlagen voneinander, was einen objektiven Vergleich der diversen zirkulären EoL-Strategien verhindert und den Bedarf dieser Arbeit unterstreicht. Es wurde nur eine Publikation identifiziert, die sich mit der Vereinfachung von Lebenszyklusanalysen in der Windkraft befasst, auch hier wurden EoL-Strategien nur nebensächlich behandelt. Weiters wurden keine Analysen für Windkraftanlagen in Österreich gefunden.

In Kapitel 5.5.1 werden durch einen umfassenden Vergleich der in Kapitel 5.1 definierten Szenarien⁴ zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 *„Welche Gemeinsamkeiten in den Lebenszyklusanalysen verschiedener End-of-Life-Strategien der CE lassen sich für Hauptkomponenten der Vestas V90 Windkraftanlage identifizieren?“* prozessuale Überschneidungen der Lebenszyklusanalysen aufgezeigt. Prozesse sind Tätigkeiten mit Umwelteinflüssen innerhalb der betrachteten Systemgrenzen. Beispielsweise umfassen sie: Montage- und Demontagetätigkeiten, Herstellung von Komponenten, Transporte sowie Materialverwertung und

⁴ Szenarien beschreiben die Anwendung der zirkulären EoL-Strategien auf die Systemkomponenten der Vestas V90 Windkraftanlage.

-vermeidung. In der Bestandsanalyse (LCI) sowie in der Folgenabschätzung (LCIA) der durchgeführten Lebenszyklusanalysen treten 272 Prozesse des LCI in verschiedenen Szenarien mehrfach auf, diese lassen sich durch 112 Einzelprozesse beschreiben, wodurch sich die Gesamtanzahl an Prozessen über die Szenarien hinweg ohne Informationsverlust von 375 auf 215 Prozesse reduzieren lässt.

Die Beantwortung von Forschungsfrage 4 *„Wie kann der Ökobilanzierungsprozess der Vestas V90 für ausgewählte Komponenten und CE-Strategien simplifiziert werden?“* ist in Kapitel 5.5 umgesetzt. Im Zentrum stehen hier die Ausnutzung der zuvor identifizierten Gemeinsamkeiten im LCI (vgl. Kapitel 5.5.1) und die Anwendung des 1 % Cut-off-Kriteriums (vgl. Kapitel 5.5.2) nach ISO 14040 (ISO, 2006a) und ISO 14044 (ISO, 2006b) auf die LCIA-Ergebnisse. Dadurch können die zur Beschreibung der EoL-Szenarien verwendeten Prozesse erheblich reduziert werden. Das Cut-Off-Kriterium vernachlässigt all jene Aktivitäten, die im LCIA des jeweiligen Szenarios einen Gesamteinfluss von weniger als 1 % zum Global Warming Potential (GWP) aufweisen. Die Anzahl Prozesse, die für eine umfassende Beschreibung aller Szenarien nötig ist, kann allein durch die Anwendung dieses Kriteriums von 375 auf 91 um 75 % gesenkt werden. Werden zudem die Gemeinsamkeiten berücksichtigt, so entsteht eine simplifizierte LCA-Berechnungsmethode, die nur noch 70 Einzelprozesse für die Beschreibung aller Szenarien benötigt. Die Ergebnisse bleiben trotz der starken Vereinfachung sehr genau. Die Resultate der simplifizierten Methode gegenüber den umfassenden Lebenszyklusanalysen sind in Kapitel 5.5.3 evaluiert. Dabei blieben die Abweichungen zu den umfassenden LCIA-Ergebnissen in fast allen Szenarien und Einflusskategorien unter 4 % (durchschnittlich 1,2 %), oft sogar unter 1 %. Somit kann die vereinfachte Methode die Umweltauswirkungen mit einer Genauigkeit von durchschnittlich 98,8 % gegenüber den umfassenden Lebenszyklusanalysen in allen betrachteten Einflusskategorien (GWP, AP, EP, POF) abbilden. Das zeigt, dass eine Ersparnis im Aufwand von Lebenszyklusanalysen für zirkuläre EoL-Strategien am Beispiel der Vestas V90 möglich ist, ohne die Ergebnisqualität erheblich zu beeinträchtigen.

Aus den obigen Resultaten werden am Beispiel der Vestas V90 Anforderungen an eine LCA-basierte simplifizierte Bewertungsmethode für zirkuläre EoL-Strategien an Windkraftanlagen (Forschungsfrage 1) abgeleitet. Eine dieser Anforderungen ist, dass die simplifizierte Methode die Ergebnisse der vollständigen Lebenszyklusanalysen mit ausreichender Genauigkeit in den relevanten Einflusskategorien abbildet, hierbei werden Abweichungen von weniger als 10 % angestrebt. Die simplifizierte Methode soll den Aufwand in der Umsetzung von Lebenszyklusanalysen unter Einhaltung der Genauigkeit so weit wie möglich reduzieren. Weiters muss die Methode für eine Reproduzierbarkeit ausreichend dokumentiert und sollte auf andere, technisch ähnliche Windkraftanlagen mit vergleichbaren Standortbedingungen übertragbar sein.

Dies schließt eine klare Definition der im Betrachtungsrahmen gewählten Systemgrenzen mit ein.

Wird eine ähnliche simplifizierte Methode abseits der dieser Arbeit mit dem Ziel entwickelt, diese mit der in der vorliegenden Arbeit zu vergleichen, so sollten die Modellierungsansätze und das methodische Vorgehen ebenfalls übereinstimmen. In der vorliegenden Diplomarbeit wird gezeigt, dass durch Anwendung der simplifizierten Methode über alle Szenarien hinweg eine Gesamt-Reduktion der Prozesse um 81 % möglich ist, wobei die Genauigkeit bis auf eine Ausnahme in keinem Szenario für keine der vier Einflusskategorien (GWP, AP, EP, POF) unter 96 % fällt. Somit ist das Ziel erreicht, eine zeit- und ressourceneffiziente LCA-Bewertung für zirkuläre EoL-Strategien in der Windkraft bereitzustellen, die dennoch ausreichend genau ist.

6.2 Weitere Ergebnisse

Zusätzlich zur Beantwortung der Forschungsfragen werden hier weitere Ergebnisse dieser Diplomarbeit hervorgehoben. Wie in Kapitel 5.4 ersichtlich konnte eine ökologische Bewertung der verschiedenen zirkulären EoL-Strategien in der Windkraft anhand der Vestas V90 durchgeführt werden. Es wurde bestätigt, dass die Strategien der verlängerten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) den Strategien der Materialverwertung (Repurpose, Recycle, Recover) um ein Vielfaches überlegen sind. Repowering war für alle vier betrachteten Systemkomponenten (Fundament, Turm, Gondel, Rotor) in den Einflusskategorien (GWP, AP, EP, POF) die Strategie mit dem größten Umweltnutzen. Mit Ausnahme des Recyclings des Fundaments erzeugten alle definierten Szenarien positive Umweltauswirkungen. Das liegt insbesondere an der aufwendigen Zerkleinerung großer Mengen an Stahlbeton sowie deren Abtransport. Wie im Zuge des LCIA besprochen, sind dabei Szenarien der verlängerten Lebensdauer mit Szenarien der Materialverwertung kombinierbar. Die Kombinationen mit dem größten Umweltnutzen sind somit für alle Systemkomponenten das Repowering und ein anschließendes Recycling der Materialien.

Betrachtet man die übergebliebenen Prozesse der simplifizierten LCA-Berechnungsmethode anhand der einzelnen Szenarien, so wird für alle Strategien der erweiterten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) deutlich, dass die Vermeidung der elektrischen Energieproduktion den größten Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat. Diese trägt als Einzelprozess in allen Einflusskategorien zumindest zu 90,69 % zum Gesamtergebnis (nach Beträgen) in den zutreffenden Szenarien bei. Beim Repowering der Windkraftanlagen sind außerdem Prozesse im Zusammenhang mit der Produktion von GFK & CFK maßgeblich. Die Umweltauswirkungen des Repurposing des Rotors werden im Wesentlichen durch die Recyclingprozesse der Gusseisennabe sowie durch die

Substitution konventioneller Materialien wie Stahl und Beton bestimmt. Wie in Kapitel 5.3.5 dargestellt, finden die Rotorblätter im Rahmen des Repurposing eine Wiederverwendung als Baumaterial für Fußgängerbrücken, wodurch der Einsatz von Stahl und Beton vermieden werden kann. In den Recycling-Szenarien der Systemkomponenten leisten Aktivitäten im Zusammenhang mit der Zerkleinerung, dem Transport und der Verarbeitung des Stahlbetons erhebliche Beiträge. Für den Turm, die Gondel und den Rotor bleiben die Transporte, Recycling-Prozesse und vermiedene Herstellung der Metalle Teil der simplifizierten Berechnungsmethode. Zusätzlich kommen für den Rotor die Zerkleinerung, das thermische Recycling des CFK (Pyrolyse) und die damit verbundene Vermeidung von Primär-Kohlenstofffasern sowie das mechanische Recycling des GFK (Verwendung in SMC-Anwendungen) hinzu. Bei der thermischen Verwertung (Recover) des Rotors gibt es einige Ähnlichkeiten. So sind auch hier die Zerkleinerung der Rotorblätter, Transporte von GFK und Gusseisen, das Recycling des Gusseisens, des Stahls und des Kupfers zusammen mit der Gewinnung von Wärme die bestimmenden Prozesse.

In der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 5.4.2 wurden anstatt einzelner Prozesse übergeordnete Parameter mit Einfluss auf mehrere Aktivitäten gezielt variiert. Aus ihr geht hervor, dass die wenigsten Parameter starken Einfluss auf die LCIA-Ergebnisse haben, wodurch die Robustheit der Lebenszyklusanalysen untermauert wird. Eine Verlängerung bzw. Verkürzung der Dauer der Lebensdauererweiterung führte hingegen in den Szenarien der erweiterten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) zu einer Steigerung bzw. Reduktion des Umweltnutzens im annähernd selben Maße. Demnach führt eine Verlängerung der Dauer der Lebensdauererweiterung um +50 % zu einem Nutzen in allen Einflusskategorien um ebenfalls nahezu +50 %. Wie zuvor diskutiert, werden die Umweltauswirkungen dieser Szenarien fast ausschließlich durch einen Einzelprozess, nämlich der Vermeidung der elektrischen Energieproduktion bestimmt. Eine Veränderung dieser setzt sich daher nahezu direkt proportional in die LCIA-Ergebnisse um. Auch die Ausfallquoten, die Transportdistanzen, die Energieaufwände bei Montagetätigkeiten und die Aufwände bei der Materialverwertung wurden in der durchgeführten Sensitivitätsanalyse geprüft, wobei die Änderungen in den Ergebnissen gering blieben. Nur für das Recycling des Fundaments waren diese erheblich. Die Begründung dafür liegt darin, dass dieses Szenario geringe Gesamt-Umwelteinflüsse aufweist. Die positiven und negativen Umweltauswirkungen der Einzelprozesse heben sich somit größtenteils gegeneinander auf. Bereits geringfügige Veränderungen in den Prozessen haben stellenweise große Auswirkungen auf die Gesamtergebnisse. Somit ergeben sich Veränderungen in den LCIA-Ergebnissen von zum Teil mehreren Hundert Prozent, die Variation der Transportdistanzen um +50 % resultiert dadurch sogar in einer Veränderung des GWP um 1460 %.

6.3 Einordnung und Diskussion der Ergebnisse

Nach der Zusammenfassung der Resultate sollen diese nun in den Kontext der bestehenden Forschung eingeordnet werden.

Bisherige Studien (vgl. Kapitel 3) betrachteten überwiegend nur einzelne EoL-Strategien. Es konnte nur eine weitere wissenschaftliche Publikation identifiziert werden, die sich mit der Vereinfachung der Bewertung von EoL-Strategien in der Windkraft befasst (vgl. Kapitel 3.4). Darin untersuchen Gennitsaris et al. (2023) Strategien der Materialverwertung (mechanisches Recycling, Pyrolyse, Mikrowellen-Pyrolyse, Repurpose und Deponierung) in den Einflusskategorien Land Occupation, Global Warming Potential und Fossil and Nuclear Energy Use. Die Auflösung der Ergebnisse wird hier anders als in der vorliegenden Arbeit anhand einer groben Materialuntergliederung (Metalle, Beton und Rotorblätter) und für 11 Szenarien, die sich aus mehreren Strategien zusammensetzen (z. B. mechanisches Recycling der Metalle und des Fundaments sowie Repurposing der Rotorblätter), beschrieben. Die Vereinfachung der Bewertung in dieser Publikation versucht nicht direkt die Durchführung von Lebenszyklusanalysen zu vereinfachen, sondern durch die Zusammenführung von Data Envelopment Analysis (DEA) und der der Lebenszyklusanalyse (LCA) technologische, wirtschaftliche und ökologische Perspektiven gemeinsam bewertbar zu machen.

Die Ergebnisse des LCIA sind mit der in Kapitel 2.1.2 dargestellte Abfallhierarchie der CE konsistent, wonach höher gereihte Strategien (im vorliegenden Fall die Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower) in der Regel die niedrigsten Umweltschäden erzeugen. Dies hat insbesondere damit zu tun, dass die Use-Phase verlängert wird und somit mehr elektrische Energie je Windkraftanlage produziert werden kann. Auch im Sinne des europäischen Green Deals kann die Verlängerung der Lebensdauer von Windkraftanlagen als effektives Mittel zur Emissionsreduktion eingesetzt werden (vgl. Kapitel 1.1).

Die Ergebnisse der Fallstudie der Vestas V90 stimmen weitgehend mit der in Kapitel 3 inkludierten Literatur überein. Ein direkter Zahlenvergleich ist aufgrund der Betrachtung der EoL-Phase und Systemkomponenten-Ebene dieser Diplomarbeit nur schwer möglich, dennoch lassen sich allgemeine Aussagen vergleichen. So bestätigt Martínez et al., (2018) ebenfalls den Umweltnutzen und die Wichtigkeit von Repowering in der Windenergie durch die erhöhte Energieausbeute und effizientere Flächennutzung. Wie von Mello et al. (2022) beschrieben, kann die Lebensdauer von Windkraftanlagen im Zuge von Repowering über die in dieser Diplomarbeit angenommene Gesamtbetriebsdauer von 30 Jahren sogar auf bis zu 50 Jahre verlängert werden, wodurch ein noch größerer Umweltnutzen möglich ist. Weiters werden die Lebensdauererweiterung sowie die Wiederverwendung nicht nur in dieser Arbeit, sondern auch Gervásio et al. (2014) aus Umweltsicht als besonders effiziente

Strategien bewertet. Entsprechend Liu et al. (2021), Pincelli et al. (2024) und Jensen (2019) kann ein Recycling der Metalle am Ende der Betriebsdauer die Treibhausgas-Emissionen je produzierter kWh elektrischer Energie um 20–50 % senken. Insbesondere beim Recycling des Turms und der Gondel der Vestas V90 (diese beiden Systemkomponenten bestehen hauptsächlich aus Metallen, vgl. Kapitel 5.2.1) wird die Effizienz von Metallrecycling ersichtlich. Auch das Repurposing von Rotorblättern resultiert in der vorliegenden Arbeit ähnlich zu Johst et al. (2023), Nagle et al. (2022) und Gennitsaris et al. (2023) in einem Umweltnutzen, wobei dieser dem des Recyclings als Strategie der Materialverwertung deutlich unterlegen und mit der thermischen Verwertung (Recover) vergleichbar ist. Laut Pender et al. (2024) entstehen sowohl durch das mechanische Recycling von GFK als auch durch die Pyrolyse von CFK positive Umweltauswirkungen, Pincelli et al. (2024) und Sproul et al. (2023) bestätigen dies für das mechanische Recycling, wobei die letztgenannte Publikation für Pyrolyse-Prozess von CFK negative Umweltauswirkungen berechnet. In den detaillierten LCIA-Ergebnissen dieser Diplomarbeit ist ersichtlich, dass die Pyrolyse aufgrund der Wiederverwendbarkeit der gewonnenen Kohlefasern einen Nutzen aus Umweltsicht bringt.

6.4 Einschränkungen und Ausblick

Rahmen der Betrachtung

Die Betrachtungsweise der vorliegenden Arbeit bezieht sich speziell auf eine Vestas V90-2MW Windkraftanlage mit Stahlrohrturm, Getriebe und Hybrid-Rotorblättern (bestehend aus GFK und CFK) am Anlagenstandort in Poysdorf-Wilfersdorf (Österreich). Für eine sinnvolle Bearbeitung der Forschungsfragen im Rahmen dieser Diplomarbeit war eine Betrachtung mehrerer Windkraftanlagen nicht möglich. Es werden ausschließlich Umweltauswirkungen von EoL-Strategien der CE mit einem kommerziell nutzbaren technologischen Reifegrad von 8–9 berücksichtigt (chemisches Recycling, Deponierung und weitere Strategien bleiben unbehandelt). Die im LCI (vgl. Kapitel 5.3) definierten Systemgrenzen sind die Grundlage dafür, welche Aktivitäten Teil der Betrachtung sind. Diese beinhalten zwar die Hauptkomponenten der Vestas V90 (Fundament, Turm, Gondel, Rotor), vernachlässigen aber die zusätzlich notwendige Infrastruktur wie deren Netzanschluss und Zufahrtsstraßen. Die gefunden Ergebnisse beziehen sich somit explizit auf diese Betrachtungsweise, was eine Einschränkung dieser Arbeit darstellt.

Das Vorgehen bei der Simplifizierung der LCA-Berechnung richtet sich hier an der Einflusskategorie des Global Warming Potentials. Andere Umwelteinflüsse wie das Acidification Potential, das Eutrophication Potential sowie die Photochemical Oxidant Formation werden erst nachträglich zur Evaluierung betrachtet. Prozesse, die insgesamt weniger als 1 % zum Global Warming Potential beitragen, werden vernachlässigt, wobei diese in weiteren Einflusskategorien relevanter sein können. In

Spezialfällen kann dies insbesondere bei der Übertragung des simplifizierten Vorschlags auf weitere Windkraftanlagen zu Fehlabschätzungen führen.

Datenbasis und Unsicherheiten

Ökobilanzen basieren auf Datenquellen, Lücken in diesen Daten werden durch ähnliche Systeme und Annahmen geschlossen. Weiters werden Modellierungsansätze verwendet, die Einfluss auf die LCIA-Ergebnisse und die simplifizierte Methode haben. Die LCI-Daten von Lebenszyklusanalysen sind selten vollständig, da dies ein detailliertes Wissen über das Produktsystem voraussetzt und in der Anwendung in Anbetracht der Zielsetzung meist unverhältnismäßig ist (EK, 2016; Shi & Yan, 2024). Auch in der vorliegenden Diplomarbeit kann nicht von einer kompletten Bestandsanalyse (LCI) ausgegangen werden. Beispielsweise wurde aufgrund der Datenlage anstatt der exakten Stückliste und den entsprechenden Fertigungsprozessen eine Materialliste zur Prozessmodellierung verwendet. Datenlücken innerhalb der im LCI definierten Systemgrenzen (vgl. Kapitel 5.3) wurden durch Annahmen, Vereinfachungen, der Verwendung der ecoinvent-Datenbank sowie anhand der branchenspezifischen Literatur geschlossen. Es wurde versucht, alle relevanten Prozesse abzudecken, dennoch bleiben die Datenqualität und -verfügbarkeit eine Limitierung – insbesondere seltene Materialien oder Prozesse könnten unter- oder überrepräsentiert sein. Die Einführung verpflichtender digitaler Produktpässe kann dazu beitragen, die Daten entlang der Lieferketten verfügbar und transparent zu machen und dadurch die Datenqualität von Lebenszyklusanalysen zukünftig erhöhen (EU, 2024).

Limitationen der Ergebnisse

Die simplifizierte Methode dieser Arbeit zeigt die größten Effizienzgewinne in Szenarien, die eine höhere Anzahl an Prozessen für die umfassende Beschreibung des LCI benötigen. Eine Übertragung dieser Methode auf andere Produktsysteme in der Windkraft kann, sofern bereits in der umfassenden Betrachtung nur wenige Prozesse für die Darstellung aller Aktivitäten nötig sind, deutlich ineffektiver in der Reduktion der Anzahl der Prozesse sein, was ebenfalls eine Grenze darstellt.

In der realen Umsetzung von EoL-Strategien an Windkraftanlagen spielen neben Umweltaspekten vor allem auch ökonomische und politische Gesichtspunkte eine Rolle. Die vorliegende Arbeit zeigt zwar sehr deutlich die Umweltperformance verschiedener EoL-Strategien, vernachlässigt aber weitere für Stakeholder relevante Blickwinkel. So können beispielsweise im Zuge von Repowering Strom-Erträge bestehender Windparks erhöht werden, die Betreiber_innen wirtschaftliche Vorteile bringen. Umweltschädliche Praktiken hingegen, wie die Deponierung von Anlagenteilen, sind aufgrund ökonomischer Entscheidungspunkte aus globaler Sicht immer noch eine geduldete und gängige Praxis (Joustra et al., 2021; Tota-Maharaj &

McMahon, 2021). Politische und finanzielle Anreizsysteme können hier zielgerichtet eingesetzt werden, um Nachhaltigkeit im EoL-Management zu fördern.

Anforderungen an die Übertragbarkeit

Der simplifizierte Vorschlag zur Berechnung zirkulärer EoL-Strategien in der Windkraft anhand der Vestas V90 (vgl. Kapitel 5.5) lässt sich unter bestimmten Voraussetzungen auf ähnliche Windkraftanlagen übertragen, darunter fällt insbesondere die Ähnlichkeit des LCI. Dieses setzt sich grundsätzlich aus standortspezifischen Gegebenheiten (z. B. Windbedingungen, infrastrukturelle Möglichkeiten für das Recycling und die thermische Verwertung von Materialien, Transportwege, Strom- und Energie-Mix), der Anlagenbauweise (im Falle der Vestas V90, bestehend aus Stahlrohrturm, Gondel mit Getriebe, drei Hybrid-Rotorblätter aus GFK und CFK) und die damit verbundene Materialzusammensetzung der Komponenten sowie den gewählten Systemgrenzen, Annahmen und Entscheidungen in den jeweiligen Szenarien zusammen (vgl. Kapitel 5.3). Weisen die LCI-Daten der Vestas V90 eine starke Ähnlichkeit zu einer weiteren Windkraftanlage auf, so kann der in Kapitel 5 entwickelte simplifizierte Vorschlag für Näherungen herangezogen werden, um die Umweltauswirkungen von zirkulären CE-Strategien zu berechnen. Dafür wird die in Kapitel 5.5.3 genannte reduzierte Anzahl an ecoinvent-Prozessen verwendet, wobei die Zahlenwerte der quantifizierten Elementarflüsse im LCI in Anlehnung an das Vorgehen in Kapitel 5.3 an die betrachtete Windkraftanlage angepasst werden. Sinkt die Genauigkeit in den verbleibenden Einflusskategorien unter bestimmten Wert, so wird empfohlen, 1–2 weitere Prozesse nachzurücken. Unterscheidet sich eine Windkraftanlage stark von der betrachteten Vestas V90, so kann der entwickelte Vorschlag zur Simplifizierung dennoch als Leitfaden für die Entwicklung einer vereinfachten LCA-Berechnungsmethode genutzt werden. Diese kann unter Erfüllung der Ähnlichkeiten wiederum auf weitere Windkraftanlagen übertragbar sein.

Ausblick und Weiterentwicklung

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte simplifizierte Methode zur Abschätzung der Umwelteinflüsse zirkulärer EoL-Strategien stellt ein Prototyp dar. Anknüpfende Werke können diesen nutzen, testen, weiterentwickeln (z. B. im globalen Kontext) und um zusätzliche EoL-Strategien erweitern. Insbesondere EoL-Strategien mit einem nicht kommerziell nutzbaren technologischen Reifegrad von weniger als 8 sowie aufstrebende Verfahren können anhand aktueller bzw. in absehbarer Zeit zu erwartenden Prozessdaten modelliert und in die bestehende Methode integriert werden. Zudem ist die Berücksichtigung von Full-Repower-Szenarien (nicht nur partial) und linearen Strategien wie der Deponierung von Materialien sinnvoll. Das Reuse-Szenario kann verfeinert werden, indem konkrete Anlagenstandorte für die Zweitnutzung definiert und die Transportdistanzen angepasst werden. Das Repurpose-Szenario wurde vereinfacht in Anlehnung an das Literaturbeispiel von Nagle et al. (2022) modelliert, dieses beschreibt die detaillierte Verwendung von

Rotorblättern einer deutlich kleineren Windkraftanlage, es können spezielle Repurposing-Anwendungen für die Rotorblätter der Vestas V90 entwickelt und in das bestehende Modell integriert werden. Sofern in den Szenarien weitere Aktivitäten bekannt werden, können diese ebenfalls nahtlos in die Bestandsanalyse (LCI) aufgenommen werden, wobei die Folgenabschätzung (LCIA) sowie die Bewertung der Prozesse im Übergang zur simplifizierten Methode wie in der vorliegenden Arbeit beschrieben erneut durchgeführt werden müssen.

Neben den vier betrachteten Einflusskategorien gibt es wie im Zuge der Literaturanalyse in Kapitel 3.4 ersichtlich weitere Umwelteinflüsse, die im Rahmen dieser Diplomarbeit zur Beherrschung der Komplexität unberücksichtigt bleiben. Dies stellt eine Einschränkung dar. Angrenzende und weiterführende Werke können die vorliegende Arbeit um zusätzliche Einflusskategorien erweitern.

Es ist denkbar, dass bei der Anwendung des simplifizierten Vorschlags auf mehrere Windkraftanlagen ein Zusammenhang zwischen dem hier verwendeten 1 % Cut-off bezüglich des GWP und einem Cut-off der Masse der Materialien identifiziert und ausgenutzt werden kann. Dies hätte den Vorteil, dass die zeitintensive Erstellung des umfassenden LCI nicht mehr nötig ist.

Der vorgestellte Vorschlag des simplifizierten LCA-Modells kann durch Ausnutzung der in Kapitel 5.5.1 identifizierten Gemeinsamkeiten in eine standardisierte Berechnungsmethode mit einem User-Interface weiterentwickelt werden, um die Verfügbarkeit für Entscheidungsträger und wissenschaftliche Anwendungen zu erhöhen. Dieses kann nicht nur für die systematische Bewertung von zirkulären EoL-Strategien, sondern auch für die Identifikation kritischer Umweltaspekte verwendet werden. Es lassen sich weitere Kriterien wie ökonomische und politische Blickwinkel integrieren.

Diese Arbeit stellt damit eine robuste Grundlage für die praxisnahe Anwendung vereinfachter LCA-Verfahren im EoL-Management von Windkraftanlagen dar. Durch die erzielte Balance zwischen Aufwandseffizienz und Ergebnisgenauigkeit der simplifizierten Methode sowie durch den Vergleich verschiedener kommerziell nutzbarer zirkulärer EoL-Strategien der Vestas V90 aus Umweltsicht leistet die Methode einen wertvollen Beitrag und eröffnet Perspektiven für eine breitere Nutzung durch Stakeholder aus der Wissenschaft, Politik und Industrie.

7 Anhang

7.1 Aufbereitung der Materialliste der Vestas V90

Ziel dieses Abschnittes ist die Aufbereitung der Materialliste (vgl. Kapitel 5.2.1) der Vestas V90-2.0MW mit 80 m Nabenhöhe für den hier vorliegenden Anwendungsfall. Die betrachtete Anlage wird dabei einzeln mit jeweils einem Transformator sowie einer Schaltanlage und nicht im Verbund eines Windparks (bestehend aus mehreren Anlagen) betrachtet.

Für die Erstellung der Materialliste wurden mehrere Quellen verwendet. Ziel war es, möglichst nah an die vom Hersteller in der Lebenszyklusanalyse der Vestas V90-2MW Windkraftanlage aufbereitete Stückliste zu gelangen, dies ist für das Fundament mit einem Gesamtgewicht von 789 t direkt ableitbar, für die restlichen Turbinenkomponenten (Turm, Gondel und Rotor) hingegen wurde eine gemeinsame Liste aller verwendeter Rohmaterialien ausgewiesen, die sich insgesamt auf 248 t belaufen. Diese Quelle allein macht es unmöglich, die jeweilige Materialzusammensetzung von Gondel, Rotor und Turm präzise abzulesen (Garrett & Rønde, 2011).

Aus der Produktbroschüre des Herstellers sind die Gesamtgewichte der weiteren Hauptkomponenten ersichtlich, diese sind für den Turm bei einer Nabenhöhe von 80 m insgesamt 148 t, für die Gondel 70 t und für den Rotor 38,1 t. Der Rotor besteht aus drei Rotorblättern mit jeweils 6,67 t sowie der Nabe mit 18 t. Insgesamt hat die Turbine (ohne Fundament) entsprechend den Daten in der Produktbroschüre der Vestas V90 ein Gesamtgewicht von 256,1 t und somit 8,1 t mehr als in der Lebenszyklusanalyse von Garrett & Rønde (2011). Der Gewichtsunterschied ist dadurch begründet, dass die in der Produktbroschüre angeführte Windkraftanlage mit jeweils einem Transformator sowie einer Schaltanlage in der Gondel ausgeführt wurden. In der Lebenszyklusanalyse von Garrett & Rønde (2011) wurde ein aus 25 Vestas V90 Windkraftanlagen bestehender Windpark betrachtet, wobei diese Anlagen gemeinsame Transformator- und Schaltstationen teilen. Im von uns betrachteten Fall wird von der schwereren Gondelausführung mit 70 t ausgegangen, die einen Transformator und die Schaltanlage jeweils in den Turbinen beinhalten (Vestas Wind Systems A/S, 2009).

Die Bestimmung der Materialzusammensetzung wird nun für die einzelnen Hauptkomponenten der Vestas V90 diskutiert.

Fundament

In der vom Hersteller durchgeführten Lebenszyklusanalyse der Vestas V90 mit 80 m Nabenhöhe entfallen 789 t auf das Fundament, wobei 751 t Beton, 38,28 t

Eisenmetalle (32,2 t unspezifizierte Stahl- und Eisenmaterialien, 5 960 kg unlegierte Stähle, 120 kg hochlegierte Stähle), 120 kg thermoplastische Kunststoffe sowie 40 kg Kupfer verarbeitet wurden. Diese Werte werden übernommen (Garrett & Rønde, 2011).

Turm

Die Materialdaten zum hauptsächlich aus Stahl bestehenden Stahlrohrturm (kein Hybridturm, also ohne Beton) wurden von Garrett & Rønde (2011) nicht explizit ausgewiesen. Aus der Produktbroschüre der Vestas V90 wissen wir aber, dass der Turm bei einer Nabenhöhe von 80 m ein Gesamtgewicht von 148 t hat (Vestas Wind Systems A/S, 2009). In der von Sobaszek et al. (2023) durchgeführten Lebenszyklusanalyse wurde für eine Vestas V90 mit einer Nabenhöhe von 105 m die Materialzusammensetzung des Turms mit einem Gesamtgewicht von 256 t bereits sehr präzise bestimmt. Es wird angenommen, dass diese anteilige Gliederung linear über die Turmmasse skalierbar ist und die absoluten Gewichte aller Materialien mit einem Faktor $f = 148 \text{ t} / 256 \text{ t} = 0,578125$ multipliziert werden. Materialien, die von Sobaszek et al. (2023) als undefiniert kategorisiert wurden, werden als Stahl angenommen, da der Großteil des Turms ebenfalls aus Stahl besteht. Diese Näherung ist dadurch gerechtfertigt, dass die neben Stahl verbleibenden Materialanteile wie in Tabelle 5.2 ersichtlich mit weniger als 0,016 % Anteil an der Turmmasse unerheblich sind.

Rotor

Der Rotor und die Gliederung der verwendeten Materialien wurden von Sobaszek et al. (2023) übernommen, da sein Gesamtgewicht von 38 t konsistent auch mit dem in der Produktbroschüre der Vestas V90 angeführtem Gesamtgewicht von 38,1 t ist und die Materialien weiters auf Ebene der Subkomponenten (Generator, Getriebe, ...) erarbeitet und beschrieben werden (Vestas Wind Systems A/S, 2009).

Sobaszek et al. (2023) untergliedern die drei Rotorblätter insgesamt in 1 750 kg Stahl und 18 250 kg Kunststoffe, wobei es sich bei Letzteren größtenteils um Faserverbundwerkstoffe handeln muss (Garrett & Rønde, 2011). Es liegen keine weiteren Daten für den verwendeten Stahl vor, weshalb angenommen wird, dass hochfester niedrig legierter Stahl für die stark belasteten Blattwurzeln zum Einsatz kommt. Entsprechend Garrett & Rønde (2011) sind die Hauptmaterialien in den Rotorblättern der Vestas V90 Karbonfaser und Glasfaser in einem Epoxid-Verbund.

Weiters lagen laut dem deutschen Umweltbundesamt (2022) der Kupferanteil eines typischen Rotorblattes einer 1,5 MW Windkraftanlage für die Ableitung von Blitzen bei 0,3 % und der Anteil an Polyvinylchlorid bei 1,7 % (Deutsches Umweltbundesamt, 2022). Diese Werte wurden auch in der vorliegenden Diplomarbeit übernommen, somit errechnet sich der Kupferanteil zu 60 kg und der Polyvinylchlorid-Anteil

(thermoplastischer Kunststoff) zu 340 kg, der von den von Sobaszek et al. (2023) undefinierten Kunststoffen subtrahiert wurden.

Es verbleiben unter Vernachlässigung kleinerer Materialanteile 17 850 kg für epoxidharz-basierte Glas- und Karbon-Faserverbundwerkstoffe in den Rotorblättern. Die genaue Zusammensetzung der Rotorblätter der Vestas V90 bleibt dabei ein Unternehmensgeheimnis und wird unter Zuhilfenahme eines Berichts zur Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter des Deutschen Umweltbundesamtes (2022) abgeschätzt. Laut diesem setzen sich in Rotorblättern verwendete faserverstärkte Kunststoffe aus 60–70 % Verstärkungsfasern und 30–40 % Harz zusammen, für die folgenden Berechnungen werden 65 % Fasern und 35 % Harz angenommen. Weiters setzen sich die in dem Bericht verwendeten Faserverbundwerkstoffe zu 90,66 % aus Glas- und zu 9,34 % aus Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen zusammen, auch diese Zusammensetzung wird in der vorliegenden Diplomarbeit übernommen. In dieser Diplomarbeit errechnen sich die absoluten Massenanteile der Faser-Verbundwerkstoffe in den Rotorblättern der Vestas V90 Windkraftanlage also wie folgt zu:

- Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffe 1 667 kg
 - Kohlenstofffaser 1 084 kg
 - Epoxidharz 583 kg
- Glasfaser-Verbundwerkstoffe 16 183 kg
 - Glasfaser 10 519 kg
 - Epoxidharz 5 664 kg

Es wird angenommen, dass die verschiedenen Verbundwerkstoffe separaten Abfallströmen zugeführt werden können (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Für die Nabe und deren Hülle kommen lt. Sobaszek et al. (2023) 17 650 kg Gusseisen, 200 kg Glasfaser-Verbundwerkstoffe und 150 kg undefinierte Materialien zum Einsatz. Diese Daten werden übernommen, wobei die undefinierten Materialien dem Gusseisen hinzugerechnet werden, da eine anteilmäßige Aufteilung hier keinen Zweck erfüllt.

Gondel

Die relative Material-Zusammensetzung der Gondel der Vestas V90-2MW wurde aus der Lebenszyklusanalyse von Sobaszek et al. (2023) übernommen, da die Komponenten hier weiters sehr detailliert aufgelöst und in Subkomponenten ausgewiesen sind. Die Gondel wird dabei mit einem Gesamtgewicht von 68 t und somit um 2 t weniger als in der Produktbroschüre der Vestas V90 modelliert. Die der Gondel von Sobaszek et al. (2023) zugewiesenen Polymermaterialien entfallen dabei ausschließlich auf das Gondelgehäuse, wovon wir wissen, dass es auf Glasfaserverbundmaterialien besteht (Vestas Wind Systems A/S, 2009).

In Sobaszek et al. (2023) und anderen verwendeter Quellen sind die Materialangaben der Gondel für 26,6 t Stahl nicht genauer ausgewiesen, daher müssen diese abgeschätzt werden. In einem Bericht des Schweizer Bundesamt für Energie (2015) wurde festgestellt, dass in der Vestas V90 Windkraftanlage insgesamt 23 475 kg hochlegierte Stähle verbaut wurden (Schweizer Bundesamt für Energie, 2015). In dieser Diplomarbeit wird angenommen, dass diese hochlegierten Stähle gänzlich auf Teilkomponenten der Gondel entfallen und die verbleibende undefinierte Menge als niedriglegierter Stahl definiert wird. Diese Annahme wird getroffen, da die Stähle im Fundament und im Turm üblicherweise niedrig- oder unlegiert sind und im Rotor nur äußerst geringe Mengen an Stahl zum Einsatz kommen. Somit verbleibt nur die Gondel (Hau, 2016).

Zusammenführung

Die besprochene Vorgehensweise bei der Identifikation der Materialien für die einzelnen Systemkomponenten der Vestas V90-2MW führt zu der Materialzusammensetzung in Tabelle 5.2 in Kapitel 5.2.1. Auffällig ist, dass der Gondel mit ihren komplexen Subkomponenten, abgesehen von faserverstärkten Kunststoffen, keine Polymere zugeordnet sind. Das hat den Grund, dass die verwendeten Quellen keine genaueren Aussagen über diese machen und sie daher in der vorliegenden Arbeit als vernachlässigbar angenommen werden (Sobaszek et al., 2023).

7.2 Life Cycle Inventory (LCI) der Lebensdauererweiterung

Tabelle 7.1: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der Lebensdauererweiterung des Fundaments (Szenario 1.1) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Lebensdauererweiterung [J]	10
----------------------------	----

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil des Fundaments an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5285	14,70%	10	-7768950	market for electricity, high voltage (AT)

Tabelle 7.2: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der Lebensdauererweiterung des Turms (Szenario 1.2) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Lebensdauererweiterung [J]	10
----------------------------	----

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil des Turmes an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5285	34,10%	10	-18021850	market for electricity, high voltage (AT)

Tabelle 7.3: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der Lebensdauererweiterung der Gondel (Szenario 1.3) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Lebensdauererweiterung [J]	10
Wechselperiode Schmieröl [J]	2
jährliche Austauschrate Getriebe	3,10%
jährliche Austauschrate Generator	2,90%
Wirkungsgrad Kräne	20%

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg/10J.]	Höhe der Gondel [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieserverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Montage und Hub Ersatzteile (Getriebe, Generator, Schmieröl in 10 J)	8 445	80	6,63	33,1	diesel, burned in building machine (GLO)
Demontage und Hub Ersatzteile	Annahme: gleich wie Montage			33,1	diesel, burned in building machine (GLO)

(Fortsetzung)

b. Herstellung neuer Komponenten

	Getriebe		Generator		Schmieröl		Gesamt	ecoinvent Prozess
	[kg]	[kg/10J.]	[kg]	[kg/10J.]	[kg]	[kg/10J.]	[kg/10J.]	
Hochlegierter Stahl	2620	812,2	2090	606,1			1418	metal working, average for chromium steel product manufacturing (RER)
Gusseisen	14100	4371	3980	1154,2			5525	market for cast iron (GLO)
Kupfer			1430	414,7			415	metal working, average for copper product manufacturing (RER)
Schmieröl	280	86,8			200	1000	1087	market for lubricating oil (RER)
Gesamt	17000	5270	7500	2175	200	1000	8445	

c. Transporte

Hintransporte aus Wartung und Reparatur	Gewicht [kg/10J.]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Hintransport neues Getriebe & Generator	7445	1458	Bilbao (ES)	Rotterdam (NL)	10855	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)
Hintransport neues Schmieröl	1000	1143	Rotterdam (NL)	Ceska Trebova (CZ)	8510	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)
Transport Wartungsteam	-	172	Ceska Trebova (CZ)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	1281	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
		61	Wien (AT)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	61,0	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)
		432	-	-	432km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)

Abtransporte aus Wartung und Reparatur	Gewicht [kg/10J.]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl (hochlegiert)	1 418	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	306	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Gusseisen	5 525	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	1 193	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	415	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	144	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Abtransport altes Schmieröl	1000	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	61,0	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	1 418	40%	565	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)
Recycling des Gusseisens	5 525	91%	5 031	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	415	76%	317	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)

Recycling des Altöls	Gewicht Altöl [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Prozess- parameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	1 087	68%	1,151MJ/kg	849MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)
Zufuhr von elektrischer Energie			1,007MJ/kg	206kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Verbrauch von Propangas		32%	0,007kg/kg	5,04kg	market for propane (GLO)
Verbrennung von Kohlenwasserstoffen			38,56MJ/kg	13477MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW (Europe without Switzerland)

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil der Gondel an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5285	26,20%	10	-13846700	market for electricity, high voltage (AT)

Vermiedene Materialproduktion	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von hochlegiertem Stahl	1 418	91%	-1 291	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)
Vermeidung von Gusseisen	5 525	91%	-5 031	cast iron production (RER)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	415	76%	-317	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Vermeidung Herstellung Schmieröl	1 000	68%	-680	lubricating oil production (RER)

Tabelle 7.4: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der Lebensdauererweiterung des Rotors (Szenario 1.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Lebensdauererweiterung [J]	10
jährliche Austauschrate Rotorblatt	2,20%
Gewichts-Erhöpfungsfaktor für Sondertransporte	1,2
Wirkungsgrad Kräne	20%

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg/10J.]	Höhe des Rotors [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieseler- brauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Montage und Hub Ersatzteile (Rotorblätter)	1 467	80	1,15	5,76	diesel, burned in building machine (GLO)
Demontage und Hub Ersatzteile	Annahme: gleich wie Montage			5,76	diesel, burned in building machine (GLO)

	Kraftstoffverbrauch			ecoinvent Prozess
	[l/Rotorbl]	[l/10J]	[MJ/10J]	
Zerschneiden des Rotorblatts	56,70	12,47	449	diesel, burned in building machine (GLO)

b. Herstellung neuer Komponenten

Herstellung neuer Komponenten	Rotorblätter			ecoinvent Prozess
	[kg]	[kg/Blatt]	[kg/10J.]	
Niedrig legierter Stahl	1 750	583	128	metal working, average for steel product manufacturing (RER)
Glasfaser (in GFK)	10519	3506	771	market for glass fibre (GLO)
Epoxidharz (in CFK)	583	194	42,8	market for epoxy resin, liquid (RER)
Epoxidharz (in GFK)	5664	1888	415	market for epoxy resin, liquid (RER)
Kupfer	60	20	4,40	metal working, average for copper product manufacturing (RER)
Sonstige Polymere	340	113	24,9	market for polyvinylidenechloride, granulate (RER)

Herstellung der Karbonfaser	Rotorblätter			Einsatz pro kg Karbonfaser ¹	Einheit	Gesamt	ecoinvent Prozess
	[kg]	[kg/Blatt]	[kg/10J.]				
Karbonfaser (in CFK)	1084	361	79	33,9	[kg]	2695	market for steam, in chemical industry (RoW)
				11,5	[kg]	914	market for nitrogen, liquid (RoW)
				360,20	[MJ]	28633	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)
				33,40	[kWh]	2655	market for electricity, medium voltage (JP)
				2,00	[kg]	159	market for acrylonitrile (GLO)
				0,02	[kg]	1,59	market for vinyl acetate (RoW)

¹ lt. (Jacquet et al., 2024)

c. Transporte

Transport Wartungsteam & ausgetauschte Komponenten	Gewicht [kg/10J.]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Hintransport neues Rotorblatt	1467	70	Lem (DK)	Esbjerg (DK)	103	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)
		230	Esbjerg (DK)	Bremerhaven (DE)	337	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)
		1500	Bremerhaven (DE)	Wien (AT)	2200	market for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (RER)
		61	Wien (AT)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	107	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Abtransport zerkleinertes Rotorblatt	1467	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	89,5	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Wartungsteam	-	432	-	-	432km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)

(Fortsetzung)

Transporte für das Recycling	Gewicht [kg/10J.]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl (niedrig legiert)	128	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	27,72	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	4	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	1,53	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Polymere	25	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	1,52	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport GFK	1 187	615	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Lutherstadt Eisleben (DE)	730	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport CFK	122	968	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wischhafen (DE)	118	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle und Polymere	Gewicht [kg/10J.]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Stahl (niedrig legiert)	128	91%	117	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Kupfer	4	76%	3,36	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)
Aufbereitung sonstiger Polymerabfälle	25	88%	21,9	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)

Verbrennung von 50 % der Polymerabfälle	Gewicht [kg/10J.]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	11	3,93MJ/kg	12kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)
Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	11	7,67MJ/kg	84MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)

Mechanisches Recycling des GFK	Gewicht [kg/10J.]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	1 187	2,01MJ/kg	663kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Feinzerkleinerung in Hammermühle	1 187	0,14MJ/kg	46,2kWh	market for electricity, high voltage (AT)

Recycling des CFK in Pyrolyse	Gewicht [kg/10J.]	Prozessparameter	Gesamt [MJ]	ecoinvent Prozess
Zerkleinerung in Schneidmühlen	122	1,15MJ/kg	39,1kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	122	28MJ/kg	951kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Stickstoff-Verbrauch Pyrolyse	122	0,646kg/kg	79,0kg	market for nitrogen, liquid (RER)
CO ₂ -Emissionen der Pyrolyse	122	0,945kg/kg	116kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energiepro- duktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil des Rotors an der Energie- gewinnung	Lebensdauer- erweiterung [J]	Vermiedene Gesamt- produktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5285	25,00%	10	-13212500	market for electricity, high voltage (AT)

Vermeidung von Energieproduktion durch thermische Polymer-Verwertung	Gewicht Altstoffe [kg]	Energieoutput bei Verbrennung [MJ/kg]	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vermeidung von Wärmeproduktion	11	7,67	-83,8MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)
Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	11	3,93	-11,9kWh	market for electricity, high voltage (AT)

(Fortsetzung)

Vermiedene Materialproduktion	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	117	91%	-106	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	3	76%	-2,56	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Vermeidung Kreide (durch GFK)	771	62%	-478	market for calcium carbonate, precipitated (RER)
Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	771	38%	-293	market for glass fibre (GLO)
Vermeidung der Primärproduktion von PE	11	50%	-5,46	polyethylene production, high density, granulate (RER)

Vermiedene Produktion der Karbonfasern	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Recycelte Karbonfaser [kg]	Einsatz je kg Karbonfaser	Gesamt	ecoinvent Prozess
Herstellung von Karbonfasern	79	95%	76	33,9kg	-2560kg	market for steam, in chemical industry (RoW)
				11,5kg	-868kg	market for nitrogen, liquid (RoW)
				360,2MJ	-27202MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)
				33kWh	-2522kg	market for electricity, medium voltage (JP)
				2kg	-151kg	market for acrylonitrile (GLO)
				0,02kg	-2kg	market for vinyl acetate (RoW)

7.3 Life Cycle Inventory (LCI) von Reuse

Tabelle 7.5: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei Reuse des Turms (Szenario 2.2) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Wirkungsgrad Kräne	20%
Gewichtserhöhungsfaktor für Sondertransporte	1,2
Lebensdauererweiterung [J]	10

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwerpunktes [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieselverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Montage des Turms	148 000	40	58,08	290	diesel, burned in building machine (GLO)
Demontage des Turms	Annahme: gleich wie Montage			290	diesel, burned in building machine (GLO)

c. Transporte

	Gewicht [kg]	Distanz [km]	Gesamt [t*km]	Sondertransport [t*km]	ecoinvent-Prozess
Transport des Turms	148 000	300	44400	53280	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil des Turmes an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5285	34,10%	10	-18021850	market for electricity, high voltage (AT)

Tabelle 7.6: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei Reuse der Gondel (Szenario 2.3) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Lebensdauererweiterung [J]	10
Wechselperiode Schmieröl [J]	2
Jährliche Austauschrate Getriebe	3,10%
Jährliche Austauschrate Generator	2,90%
Wirkungsgrad Kräne	20%
Gewichts-Erhöpfungsfaktor für Sondertransporte	1,2

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwerpunkt [m]	Potentielle Energie [MJ]	Diesel- verbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Montage der Gondel	68000	80	53,37	266,80	diesel, burned in building machine (GLO)
Demontage der Gondel	Annahme: gleich wie Montage			266,80	diesel, burned in building machine (GLO)

	Gewicht [kg/10J.]	Höhe der Gondel [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieselver- brauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Montage und Hub Ersatzteile (Getriebe, Generator, Schmieröl in 10 J)	8 445	80	6,63	33,1	diesel, burned in building machine (GLO)
Demontage und Hub Ersatzteile	Annahme: gleich wie Montage			33,1	diesel, burned in building machine (GLO)

b. Herstellung neuer Komponenten

	Getriebe		Generator		Schmieröl		Gesamt	ecoinvent Prozess
	[kg]	[kg/10J.]	[kg]	[kg/10J.]	[kg]	[kg/10J.]	[kg/10J.]	
Hochlegierter Stahl	2620	812,2	2090	606,1			1418	metal working, average for chromium steel product manufacturing (RER)
Gusseisen	14100	4371	3980	1154,2			5525	market for cast iron (GLO)
Kupfer			1430	414,7			415	metal working, average for copper product manufacturing (RER)
Schmieröl	280	86,8			200	1000	1087	market for lubricating oil (RER)
Gesamt	17000	5270	7500	2175	200	1000	8445	

c. Transporte

	Gewicht [kg]	Distanz [km]	Gesamt [t*km]	Sonder- transport [t*km]	ecoinvent-Prozess
Transport der Gondel	68 000	300	20400	24480	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

Hintransporte aus Wartung und Reparatur	Gewicht [kg/10J.]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
		1458	Bilbao (ES)	Rotterdam (NL)	10855	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)
Hintransport neues Getriebe & Generator	7445	1143	Rotterdam (NL)	Ceska Trebova (CZ)	8510	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)
		172	Ceska Trebova (CZ)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	1281	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Hintransport neues Schmieröl	1000	61	Wien (AT)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	61,0	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)
Transport Wartungsteam	-	432	-	-	432km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)

Abtransporte aus Wartung und Reparatur	Gewicht [kg/10J.]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl (hochlegiert)	1 418	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	306	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Gusseisen	5 525	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	1 193	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	415	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	144	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Abtransport altes Schmieröl	1000	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	61,0	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	1 418	40%	565	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)
Recycling des Gusseisens	5 525	91%	5 031	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	415	76%	317	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)

(Fortsetzung)

Recycling des Altsöls	Gewicht Altsöl [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Prozess- parameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	1 087	68%	1,151MJ/kg	849MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)
Zufuhr von elektrischer Energie			1,007MJ/kg	206kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Verbrauch von Propangas			0,007kg/kg	5,04kg	market for propane (GLO)
Verbrennung von Kohlenwasserstoffen		32%	38,56MJ/kg	13477MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW (Europe without Switzerland)

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energiepro- duktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil der Gondel an der Energie- gewinnung	Lebensdauer- erweiterung [J]	Vermiedene Gesamt- produktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5285	26,20%	10	-13846700	market for electricity, high voltage (AT)

Vermiedene Materialproduktion	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von hochlegiertem Stahl	1 418	91%	-1 291	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)
Vermeidung von Gusseisen	5 525	91%	-5 031	cast iron production (RER)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	415	76%	-317	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Vermeidung Herstellung Schmieröl	1 000	68%	-680	lubricating oil production (RER)

	Gewicht [kg]	Distanz [km]	Gesamt [t*km]	Sonder- transport [t*km]	ecoinvent-Prozess
Transport der Gondel	68 000	300	20400	24480	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

Tabelle 7.7: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei Reuse des Rotors (Szeanrio 2.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Lebensdauererweiterung [J]	10
jährliche Austauschrate Rotorblatt	2,20%
Gewichts-Erhöpfungsfaktor für Sondertransporte	1,2
Wirkungsgrad Kräne	20%
Wirkungsgrad Kräne	20%
Gewichts-Erhöpfungsfaktor für Sondertransporte	1,2

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwer- punktes [m]	Potentielle Energie [MJ]	Diesel- verbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Montage des Rotors	38 000	80	29,82	149,11	diesel, burned in building machine (GLO)
Demontage der Rotors	Annahme: gleich wie Montage			149,11	diesel, burned in building machine (GLO)

	Gewicht [kg/10J.]	Höhe des Rotors [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieseler- brauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Montage und Hub Ersatzteile (Rotorblätter)	1 467	80	1,15	5,76	diesel, burned in building machine (GLO)
Demontage und Hub Ersatzteile	Annahme: gleich wie Montage			5,76	diesel, burned in building machine (GLO)

	Kraftstoffverbrauch			ecoinvent Prozess
	[l/Rotorblt]	[l/10J]	[MJ/10J]	
Zerschneiden des Rotorblatts	56,70	12,47	449	diesel, burned in building machine (GLO)

(Fortsetzung)

b. Herstellung neuer Komponenten

Herstellung neuer Komponenten		Rotorblätter		ecoinvent Prozess
	[kg]	[kg/Blatt]	[kg/10J.]	
Niedrig legierter Stahl	1 750	583	128	metal working, average for steel product manufacturing (RER)
Glasfaser (in GFK)	10519	3506	771	market for glass fibre (GLO)
Epoxidharz (in CFK)	583	194	42,8	market for epoxy resin, liquid (RER)
Epoxidharz (in GFK)	5664	1888	415	market for epoxy resin, liquid (RER)
Kupfer	60	20	4,40	metal working, average for copper product manufacturing (RER)
Sonstige Polymere	340	113	24,9	market for polyvinylidenchloride, granulate (RER)

Herstellung der Karbonfaser	Rotorblätter		Einsatz pro kg Karbonfaser ¹	Einheit	Gesamt	ecoinvent Prozess	
	[kg]	[kg/Blatt]	[kg/10J.]				
Karbonfaser (in CFK)	1084	361	79	33,9	[kg]	2695	market for steam, in chemical industry (RoW)
				11,5	[kg]	914	market for nitrogen, liquid (RoW)
				360,20	[MJ]	28633	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)
				33,40	[kWh]	2655	market for electricity, medium voltage (JP)
				2,00	[kg]	159	market for acrylonitrile (GLO)
				0,02	[kg]	1,59	market for vinyl acetate (RoW)

¹ lt. (Jacquet et al., 2024)

c. Transporte

	Gewicht	Distanz	Gesamt	Sondertransport	ecoinvent-Prozess
	[kg]	[km]	[t*km]	[t*km]	
Transport des Rotors	38 000	300	11400	13680	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

Transport Wartungsteam & ausgetauschte Komponenten	Gewicht	Transportdistanz	Von	Nach	Gesamt	ecoinvent Prozess
	[kg/10J.]	[km]			[t*km]	
Hintransport neues Rotorblatt	1467	70	Lem (DK)	Esbjerg (DK)	103	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)
		230	Esbjerg (DK)	Bremerhaven (DE)	337	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)
		1500	Bremerhaven (DE)	Wien (AT)	2200	market for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (RER)
		61	Wien (AT)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	107	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Abtransport zerkleinertes Rotorblatt	1467	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	89,5	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Wartungsteam	-	432	-	-	432km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)

Transporte für das Recycling	Gewicht	Transportdistanz	Von	Nach	Gesamt	ecoinvent Prozess
	[kg/10J.]	[km]			[t*km]	
Transport Stahl (niedrig legiert)	128	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	27,72	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	4	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	1,53	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Polymere	25	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	1,52	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport GFK	1 187	615	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Lutherstadt Eisleben (DE)	730	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport CFK	122	968	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wischhafen (DE)	118	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle und Polymere	Gewicht	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-	Gesamt	ecoinvent Prozess
	[kg/10J.]		[kg]	
Stahl (niedrig legiert)	128	91%	117	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Kupfer	4	76%	3,36	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)
Aufbereitung sonstiger Polymerabfälle	25	88%	21,9	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)

(Fortsetzung)

Verbrennung von 50 % der Polymerabfälle	Gewicht [kg/10J.]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	11	3,93MJ/kg	12kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)
Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	11	7,67MJ/kg	84MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)

Mechanisches Recycling des GFK	Gewicht [kg/10J.]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	1 187	2,01MJ/kg	663kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Feinzerkleinerung in Hammerrmühle	1 187	0,14MJ/kg	46,2kWh	market for electricity, high voltage (AT)

Recycling des CFK in Pyrolyse	Gewicht [kg/10J.]	Prozessparameter	Gesamt [MJ]	ecoinvent Prozess
Zerkleinerung in Schneidmühlen	122	1,15MJ/kg	39,1kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	122	28MJ/kg	951kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Stickstoff-Verbrauch Pyrolyse	122	0,646kg/kg	79,0kg	market for nitrogen, liquid (RER)
CO2-Emissionen der Pyrolyse	122	0,945kg/kg	116kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil des Rotors an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5285	25,00%	10	-13212500	market for electricity, high voltage (AT)

Vermeidung von Energieproduktion durch thermische Polymer-Verwertung	Gewicht Altstoffe [kg]	Energieoutput bei Verbrennung [MJ/kg]	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vermeidung von Wärmeproduktion	11	7,67	-83,8MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)
Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	11	3,93	-11,9kWh	market for electricity, high voltage (AT)

Vermiedene Materialproduktion	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	117	91%	-106	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	3	76%	-2,56	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Vermeidung Kreide (durch GFK)	771	62%	-478	market for calcium carbonate, precipitated (RER)
Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	771	38%	-293	market for glass fibre (GLO)
Vermeidung der Primärproduktion von PE	11	50%	-5,46	polyethylene production, high density, granulate (RER)

Vermiedene Produktion der Karbonfasern	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Recycelte Karbonfaser [kg]	Einsatz je kg Karbonfaser	Gesamt	ecoinvent Prozess
Herstellung von Karbonfasern	79	95%	76	33,9kg	-2560kg	market for steam, in chemical industry (RoW)
				11,5kg	-868kg	market for nitrogen, liquid (RoW)
				360,2MJ	-27202MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)
				33kWh	-2522kg	market for electricity, medium voltage (JP)
				2kg	-151kg	market for acrylonitrile (GLO)
				0,02kg	-2kg	market for vinyl acetate (RoW)

7.4 Life Cycle Inventory (LCI) von Repower

Tabelle 7.8: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der beim Repowering des Fundaments (Szenario 3.1) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Verlängerte Betriebsdauer durch Repowering [J]	10
--	----

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil des Fundaments an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5681,4	14,70%	10	-8351658	market for electricity, high voltage (AT)

Tabelle 7.9: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der beim Repowering des Turms (Szenario 3.2) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Verlängerte Betriebsdauer durch Repowering [J]	10
--	----

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil des Turmes an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5681,4	34,10%	10	-19373574	market for electricity, high voltage (AT)

Tabelle 7.10: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der beim Repowering der Gondel (Szenario 3.3) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Verlängerte Betriebsdauer durch Repowering [J]	10
Wechselperiode Schmieröl [J]	2
Jährliche Austauschrate Getriebe	3,10%
Jährliche Austauschrate Generator	2,90%
Wirkungsgrad Kräne	20%

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg/10L.]	Höhe der Gondel [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieselsverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Montage und Hub Ersatzteile (Getriebe, Generator, Schmieröl in 10 J)	8 445	80	6,63	33,1	diesel, burned in building machine (GLO)
Demontage und Hub Ersatzteile	Annahme: gleich wie Montage			33,1	diesel, burned in building machine (GLO)

b. Herstellung neuer Komponenten

	Getriebe		Generator		Schmieröl		Gesamt	ecoinvent Prozess
	[kg]	[kg/10L.]	[kg]	[kg/10L.]	[kg]	[kg/10L.]	[kg/10L.]	
Hochlegierter Stahl	2620	812,2	2090	606,1			1418	metal working, average for chromium steel product manufacturing (RER)
Gusseisen	14100	4371	3980	1154,2			5525	market for cast iron (GLO)
Kupfer			1430	414,7			415	metal working, average for copper product manufacturing (RER)
Schmieröl	280	86,8			200	1000	1087	market for lubricating oil (RER)
Gesamt	17000	5270	7500	2175	200	1000	8445	

(Fortsetzung)

c. Transporte

Hintransporte aus Wartung und Reparatur	Gewicht [kg/10L]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
		1458	Bilbao (ES)	Rotterdam (NL)	10855	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)
Hintransport neues Getriebe & Generator	7445	1143	Rotterdam (NL)	Ceska Trebova (CZ)	8510	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)
		172	Ceska Trebova (CZ)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	1281	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Hintransport neues Schmieröl	1000	61	Wien (AT)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	61,0	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)
Transport Wartungsteam	-	432	-	-	432km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)

Abtransporte aus Wartung und Reparatur	Gewicht [kg/10L]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl (hochlegiert)	1 418	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	306	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Gusseisen	5 525	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	1 193	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	415	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	144	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Abtransport altes Schmieröl	1000	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	61,0	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	1 418	40%	565	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)
Recycling des Gusseisens	5 525	91%	5 031	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	415	76%	317	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)

Recycling des Altlöts	Gewicht Altöl [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Prozesspara- meter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	1 087	68%	1,151MJ/kg	849MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)
Zufuhr von elektrischer Energie			1,007MJ/kg	206kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Verbrauch von Propangas			0,007kg/kg	5,04kg	market for propane (GLO)
Verbrennung von Kohlenwasserstoffen		32%	38,56MJ/kg	13477MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW (Europe without Switzerland)

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil der Gondel an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Verminderung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5681,4	26,20%	10	-14885268	market for electricity, high voltage (AT)

Vermiedene Materialproduktion	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Verminderung von hochlegiertem Stahl	1 418	91%	-1 291	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)
Verminderung von Gusseisen	5 525	91%	-5 031	cast iron production (RER)
Verminderung von Kupfer (Kathodenmaterial)	415	76%	-317	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Verminderung Herstellung Schmieröl	1 000	68%	-680	lubricating oil production (ReR)

Tabelle 7.11: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Repowering des Rotors (Szenario 3.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Betriebsdauer nach Repower [J]	10
Gewichts-Erhöpfungsfaktor für Sondertransporte	1,2
Wirkungsgrad Kräne	20%

a. Demontage und Montage der Rotorblätter

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwerpunktes [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieselverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Demontage der V90 Rotorblätter	20 000	80	15,70	78,48	diesel, burned in building machine (GLO)
Montage der V100 Rotorblätter	22500	80	17,66	88,29	diesel, burned in building machine (GLO)

	Kraftstoffverbrauch [l/Rotor]	Energieinhalt Diesel [MJ/l]	Dieselverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Zerschneiden der 3 Rotorblätter	170	36	6124	diesel, burned in building machine (GLO)

b. Herstellung neuer Komponenten

	Gewicht [kg/Rotor]	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Niedrig legierter Stahl	1 969	1969	metal working, average for steel product manufacturing (RER)
Glasfaser	11 834	11834	market for glass fibre (GLO)
Epoxidharz (in CFK)	656	656	market for epoxy resin, liquid (RER)
Epoxidharz (in GFK)	6 372	6372	market for epoxy resin, liquid (RER)
Kupfer	67,5	67,5	metal working, average for copper product manufacturing (RER)
PVC	382,5	383	market for polyvinylidenchloride, granulate (RER)

	Rotorblätter [kg]	Einsatz pro kg Karbonfaser	Einheit	Gesamt	ecoinvent Prozess
Karbonfaser	1 220	33,9	[kg]	41341	market for steam, in chemical industry (RoW)
		11,5	[kg]	14024	market for nitrogen, liquid (RoW)
		360,20	[MJ]	439264	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)
		33,40	[kWh]	40731	market for electricity, medium voltage (JP)
		2,00	[kg]	2439	market for acrylonitrile (GLO)
		0,02	[kg]	24,4	market for vinyl acetate (RoW)

c. Transporte

Transport der alten und neuen Komponenten	Gewicht [kg]	Transportdistanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Hintransport der neuen Rotorblätter	22500	70	Lem (DK)	Esbjerg (DK)	1575	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)
		230	Esbjerg (DK)	Bremerhaven (DE)	5175	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)
		1500	Bremerhaven (DE)	Wien (AT)	33750	market for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (RER)
		61	Wien (AT)	Wilfersdorf (NÖ, AT)	1647	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Abtransport zerkleinertes Rotorblatt	20000	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	1220	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Wartungsteam	-	432	-	-	432km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)

Transporte für das Recycling der Rotorblätter	Gewicht [kg]	Transportdistanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl (niedrig legiert)	1 750	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	378	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	60	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	21	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Polymere	340	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	21	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport GFK	16 383	615	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Lutherstadt Eisleben (DE)	10 076	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport CFK	1 667	968	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wischhafen (DE)	1 614	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

(Fortsetzung)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle und Polymere	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	1 750	91%	1 593	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	60	76%	46	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)
Aufbereitung Polymerabfälle	340	88%	298	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)
Verbrennung 50% der Polymerabfälle	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	149	3,93MJ/kg	163kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)
Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	149	7,67MJ/kg	1 143MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)
Mechanisches Recycling des GFK	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	16 383	2,01MJ/kg	9 147kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Feinzerkleinerung in Hammermühle	16 383	0,14MJ/kg	637kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Recycling des CFK in Pyrolyse	Gewicht CFK [kg]	Prozessparameter	Gesamt [MJ]	ecoinvent Prozess
Zerkleinerung in Schneidmühlen	1 667	1,15MJ/kg	533kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	1 667	28MJ/kg	12 966kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Stickstoffverbrauch Pyrolyse	1 667	0,646kg/kg	1 077kg	market for nitrogen, liquid (RER)
CO2-Emissionen der Pyrolyse	1 667	0,945kg/kg	1 575kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions

e. Outputs und Avoided Burden

Vermiedene Energieproduktion	Jährliche Energieproduktion pro Vestas V90 [MWh]	Anteil des Rotors an der Energiegewinnung	Lebensdauererweiterung [J]	Vermiedene Gesamtproduktion [kWh]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	5581,4	25,00%	10	-13953500	market for electricity, high voltage (AT)

Vermeidung von Energieproduktion	Gewicht Altstoffe [kg]	Energieoutput bei Verbrennung [MJ/kg]	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vermeidung von Wärmeproduktion durch thermische Polymer-Verwertung	149	7,67	-1143MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)
Vermeidung von Elektrizitätsproduktion durch thermische Polymer-Verwertung	149	3,93	-163kWh	market for electricity, high voltage (AT)

	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	1 750	91%	-1 593	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	60	76%	-45,8	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Vermeidung Kreide (durch GFK)	10 649	62%	-6 602	market for calcium carbonate, precipitated (RER)
Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	10 649	38%	-4 047	market for glass fibre (GLO)
Vermeidung der Primärproduktion von PE	298	50%	-149	polyethylene production, high density, granulate (RER)

Vermeidung der Herstellung von Karbonfasern	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Recycelte Karbonfaser [kg]	Einsatz je kg Karbonfaser	Gesamt	ecoinvent Prozess
				33,9kg 11,5kg 360,2MJ 33kWh 2kg 0,02kg	-34896kg -11838kg -370780MJ -34381kWh -2059kg -21kg	market for steam, in chemical industry market for nitrogen, liquid (RoW) heat production, natural gas, at industrial market for electricity, medium voltage (JP) market for acrylonitrile (GLO) market for vinyl acetate (RoW)
Herstellung von Karbonfasern	1 084	95%	1029			

7.5 Life Cycle Inventory (LCI) von Repurpose

Tabelle 7.12: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Repurposing des Rotors (Szenario 4.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Wirkungsgrad Kran	20%
-------------------	-----

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwerpunktes [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieselverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Demontage des Rotors (Kran)	38 000	80	29,82	149,11	diesel, burned in building machine (GLO)
	Kraftstoffverbrauch [l/Rotor]	Energieinhalt Diesel [MJ/l]	Dieselverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess	
Zerschneiden der 3 Rotorblätter	170	36	6123,60		diesel, burned in building machine (GLO)

c. Transporte

Transporte zum Ort des Repurposing	Gewicht [kg]	Transportdistanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport der zerkleinerten Rotorblätter	20 000	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	1 220	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transporte für das Recycling der Nabe	Gewicht [kg]	Transportdistanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Gusseisen	17 800	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	3 845	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport GFK	200	615	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Lutherstadt Eisleben (DE)	123	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Gusseisens	17 800	91%	16 207	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Mechanisches Recycling des GFK der Nabe	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	200	2,01MJ/kg	112kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Feinzerkleinerung in Hammermühle	200	0,14MJ/kg	7,78kWh	market for electricity, high voltage (AT)

e. Outputs und Avoided Burden

Vermeidung aus Repurposing	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis Vermiedenes Material zu Alt-Rohstoff [%]	Vermiedene Rohstoffe	ecoinvent Prozess
Vermeidung von Beton	20 000	59%	-4,92m ³	concrete, all types to generic market for concrete, normal strength (AT)
Vermeidung niedrig legierter Stahl	20 000	24%	-4768kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidungen aus Recycling	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von Gusseisen	17 800	91%	-16 207	cast iron production (RER)
Vermeidung Kreide (durch GFK)	130	62%	-80,6	market for calcium carbonate, precipitated (RER)
Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	130	38%	-49,4	market for glass fibre (GLO)

7.6 Life Cycle Inventory (LCI) von Recycle und Recover

Tabelle 7.13: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recycling des Fundaments (Szenario 5.1) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

a. Montage und Demontage

	Menge	Verbrauch je Einheit [MJ/kg]	Gesamt	ecoinvent Prozess
Aushub (Erdschicht)	158 [m³]	-	158 [m³]	excavation, skid-steer loader (RER)
Zerkleinerung Stahlbeton (Hydraulikhammer)	7 893 200 [kg]	0,0612	483 064 [MJ]	diesel, burned in building machine (GLO)

c. Transporte

	Gewicht [kg]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Abtransport grob zerkleinertes Fundament	7 893 200	50	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Markgrafneusiedl (BGLD, AT)	397 817	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Weitertransport des Armierungsstahls	38 280	188	Markgrafneusiedl (BGLD, AT)	Donawitz (STMK, AT)	7 197	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	40	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	13,9	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Polymere	120	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	7,32	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

d. Entsorgung

Recycling des Beton und Stahl	Gewicht [kg]	Verbrauch je Einheit [MJ/kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Gesamt	ecoinvent Prozess
Zerkleinerung mit Prall- und Backenbrechern	7 893 200	0,0036	-	7 893	[kWh] market for electricity, high voltage (AT)
Recycling des Stahls zu Stahl-Barren	38 280	-	91%	34 854	[kg] steel production, electric, low-alloyed (AT)

Recycling der Metalle und Polymere	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	40	76%	30,5	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)
Aufbereitung Polymerabfälle	120	88%	105	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)

Verbrennung 50% der Polymerabfälle	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	53	3,93MJ/kg	57,4kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)
Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	53	7,67MJ/kg	403MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)

e. Outputs und Avoided Burden

	Gewicht Altstoff [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe	ecoinvent-Prozess
Vermeidung von Beton	750 880	70%	-219m³	concrete, all types to generic market for concrete, normal strength (AT)
Vermeidung von Stahl (niedrig- legiert)	38 280	91%	-34854kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	40	76%	-30,4kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Vermeidung der Primärproduktion von PE	105	50%	-52,6kg	polyethylene production, high density, granulate (RER)

Vermeidung von Energieproduktion durch thermische Polymer-	Gewicht Altstoffe [kg]	Energieoutput bei Verbrennung [MJ/kg]	Gesamt [MJ]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von Wärmeproduktion	53	7,67	-403MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)
Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	53	3,93	-57kWh	market for electricity, high voltage (AT)

Tabelle 7.14: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recycling des Turms (Szenario 5.2) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Wirkungsgrad Kran	20%
-------------------	-----

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwerpunktes [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieselverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Demontage des Turmes (Kran)	148 000	40	58,08	290	diesel, burned in building machine (GLO)

	Gewicht [kg]	spezifische Zerkleinerungsenergie [kWh/t]	gesamte Zerkleinerungsenergie [kWh]	Dieselverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Zerkleinerung und Trennung der Turmmaterialien mit Hydraulikscheren (Bagger)	148 000	10	1480	7400	diesel, burned in building machine (GLO)

c. Transporte

	Gewicht [kg]	Transportdistanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl	147 032	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	31 759	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Aluminium	749	214	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Ranshofen (OÖ, AT)	160	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	220	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	76	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

d. Entsorgung

	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	147 032	91%	133 872	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Aluminiums (zu Gusslegierung)	749	97%	727	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner (RER)
Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	220	76%	168	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)

e. Outputs und Avoided Burden

	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent-Prozess
Vermeidung von niedrig legiertem Primär-Stahl	147 032	91%	-133 872	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidung von Primär-Aluminium (Gusslegierung)	749	97%	-727	aluminium production, primary, cast alloy slab from continuous casting (RoW)
Vermeidung von Primär-Kupfer (Kathodenmaterial)	220	76%	-168	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)

Tabelle 7.15: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recycling der Gondel (Szenario 5.3) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Wirkungsgrad Kran	20%
-------------------	-----

a. Montage und Demontage

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwerpunktes [m]	Potentielle Energie [MJ]	Dieselverbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Demontage der Gondel (Kran)	68 000	80	53,37	266,83	diesel, burned in building machine (GLO)

(Fortsetzung)

c. Transporte

Transport zum Ort der Materialverarbeitung	Gewicht [kg]	Transportdistanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl (niedrig legiert)	3 091	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	668	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Stahl (hochlegiert)	23 475	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	5 071	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Gusseisen	34 805	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	7 518	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Aluminium	2 451	214	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Ranshofen (OÖ, AT)	525	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	1 691	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	589	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport GFK	1 838	615	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Lutherstadt Eisleben (DE)	1 131	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Schmieröl	648	59	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	38	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Stahls zu niedrig legiertem Stahl	3 091	91%	2 814	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	23 475	40%	9 357	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)
Recycling des Gusseisens	34 805	91%	31 690	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Aluminiums zu Gusslegierung	2 451	97%	2 379	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner (RER)
Recycling des Kupfers zu Kathodenmaterial	1 691	76%	1 291	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)

Mechanisches Recycling des GFK	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	1 838	2,01MJ/kg	1 026kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Feinzerkleinerung in Hammermühle	1 838	0,14MJ/kg	71kWh	market for electricity, high voltage (AT)

Recycling des Altöls	Gewicht Altöl [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	648	68%	1,151MJ/kg	506MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)
Zufuhr von elektrischer Energie			1,007MJ/kg	123kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Verbrauch von Propangas			0,007kg/kg	3,00kg	market for propane (GLO)
Verbrennung von Kohlenwasserstoffen		32%	38,56MJ/kg	8038MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW (Europe without Switzerland)

e. Outputs und Avoided Burden

	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	3 091	91%	-2 814	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidung von hochlegiertem Stahl	23 475	91%	-21 362	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)
Vermeidung von Gusseisen	34 805	91%	-31 690	cast iron production (RER)
Vermeidung von Aluminium (Gusslegierung)	2 451	97%	-2 379	aluminium production, primary, cast alloy slab from continuous casting (RoW)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	1 691	76%	-1 291	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Vermeidung Kreide (durch GFK)	1 195	62%	-741	market for calcium carbonate, precipitated (RER)
Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	1 195	38%	-454	market for glass fibre (GLO)
Vermeidung Herstellung Schmieröl	648	68%	-441	lubricating oil production (RER)

Tabelle 7.16: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recycling des Rotors (Szenario 5.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Wirkungsgrad Kran	20%
-------------------	-----

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwer- punktes [m]	Potentielle Energie [MJ]	Diesel- verbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Demontage des Rotors (Kran)	38 000	80	29,82	149,11	diesel, burned in building machine (GLO)
	Kraftstoff- verbrauch [l/Rotor]	Energieinhalt Diesel [MJ/l]	Diesel- verbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess	
Zerschneiden der 3 Rotorblätter	170	36	6124		diesel, burned in building machine (GLO)

c. Transporte

Transporte für das Recycling des Rotors	Gewicht [kg]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl (niedrig legiert)	1 750	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	378	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Gusseisen	17 800	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	3 845	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	60	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	20,9	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Polymere	340	61	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wien (AT)	20,7	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport GFK	16 383	615	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Lutherstadt Eisleben (DE)	10 076	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport CFK	1 667	968	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Wischhafen (DE)	1 614	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

d. Entsorgung

Recycling der Metalle und Polymere	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	1 750	91%	1 593	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Gusseisens	17 800	91%	16 207	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	60	76%	45,8	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)
Aufbereitung Polymerabfälle	340	88%	298	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)
Verbrennung 50% der Polymerabfälle	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	149	3,93MJ/kg	163kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)
Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	149	7,67MJ/kg	1 143MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)
Mechanisches Recycling des GFK	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	16 383	2,01MJ/kg	9 147kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Feinzerkleinerung in Hammermühle	16 383	0,14MJ/kg	637kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Recycling des CFK in Pyrolyse	Gewicht CFK [kg]	Prozessparameter	Gesamt [MJ]	ecoinvent Prozess
Zerkleinerung in Schneidmühlen	1 667	1,15MJ/kg	533kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	1 667	28MJ/kg	12 966kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Stickstoffverbrauch Pyrolyse	1 667	0,646kg/kg	1 077kg	market for nitrogen, liquid (RER)
CO2-Emissionen der Pyrolyse	1 667	0,945kg/kg	1 575kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions

(Fortsetzung)

e. Outputs und Avoided Burden

	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	1 750	91%	-1 593	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidung von Gusseisen	17 800	91%	-16 207	cast iron production (RER)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	60	76%	-45,8	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)
Vermeidung der Primärproduktion von PE	149	50%	-74,5	polyethylene production, high density, granulate (RER)
Vermeidung Kreide (durch GFK)	10 649	62%	-6 602	market for calcium carbonate, precipitated (RER)
Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	10 649	38%	-4 047	market for glass fibre (GLO)

Vermeidung der Herstellung von Karbonfasern	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Recycelte Karbon- fasern [kg]	Einsatz je kg Karbonfaser	Gesamt	ecoinvent Prozess
Herstellung von Karbonfasern	1 084	95%	1029	33,9kg 11,5kg 360,2MJ 33kWh 2kg 0,02kg	-34896kg -11838kg -370780MJ -34381kWh -2059kg -20,6kg	market for steam, in chemical industry (RoW) market for nitrogen, liquid (RoW) heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW) market for electricity, medium voltage market for acrylonitrile (GLO) market for vinyl acetate (RoW)

Vermeidung von Energieproduktion durch thermische Polymer-Verwertung	Gewicht Altstoffe [kg]	Energieoutput bei Verbrennung [MJ/kg]	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vermeidung von Wärmeproduktion	149	7,67	-1143MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)
Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	149	3,93	-163kWh	market for electricity, high voltage (AT)

Tabelle 7.17: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recovery des Rotors (Szenario 6.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)

Parameter

Wirkungsgrad Kran	20%
-------------------	-----

a. Montage & Demontage

	Gewicht [kg]	Höhe des Schwer- punktes [m]	Potentielle Energie [MJ]	Diesel- verbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Demontage des Rotors (Kran)	38 000	80	29,82	149,11	diesel, burned in building machine (GLO)

	Kraftstoff- verbrauch [l/Rotor]	Energieinhalt Diesel [MJ/l]	Diesel- verbrauch [MJ]	ecoinvent-Prozess
Zerschneiden der 3 Rotorblätter	170	36	6124	diesel, burned in building machine (GLO)

c. Transporte

Recover-Materialien	Gewicht [kg]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Polymere	340	12	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Zistersdorf (NÖ, AT)	4,08	market for transport, freight, lorry, 16- 32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport GFK	16 383	962	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Längendorf (DE)	15 760	market for transport, freight, lorry, 16- 32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport CFK	1 667	387	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Hart (DE)	645	market for transport, freight, lorry, 16- 32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

(Fortsetzung)

Recycling-Materialien	Gewicht [kg]	Transport- distanz [km]	Von	Nach	Gesamt [t*km]	ecoinvent Prozess
Transport Stahl (niedrig legiert)	1 750	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	378	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Gusseisen	17 800	216	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Donawitz (STMK, AT)	3 845	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)
Transport Kupfer	60	348	Wilfersdorf (NÖ, AT)	Sinabelkirchen (STMK, AT)	20,88	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)

d. Entsorgung

Verbrennung der Polymerabfälle	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere	340	3,93MJ/kg	371kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)
Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere	340	7,67MJ/kg	2608MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)

Recover des GFK	Gewicht [kg]	Prozessparameter	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	16 383	2,01MJ/kg	9 147kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Verbrennung des Epoxidharzes zur prozessinternen Wärmegegewinnung	5 734	-	5 734kg	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)

Recover des CFK	Gewicht CFK [kg]	Prozessparameter	Gesamt [MJ]	ecoinvent Prozess
Zerkleinerung in Schneidmühlen	1 667	1,15MJ/kg	533kWh	market for electricity, high voltage (AT)

Recycling der Metalle	Gewicht [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-	Gesamt [kg]	ecoinvent Prozess
Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	1 750	91%	1 593	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Gusseisens	17 800	91%	16 207	steel production, electric, low-alloyed (AT)
Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	60	76%	45,8	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)

e. Outputs und Avoided Burden

Vermeidung von Energieproduktion durch Verwertung	Gesamt	ecoinvent Prozess
Vermeidung von Wärmeproduktion	-2608MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)
Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-371kWh	market for electricity, high voltage (AT)
Vermeidung von Wärmeenergie aus Steinkohle	-5 734MJ	heat and power co-generation, hard coal (DE)

Vermeidungen aus CFK & GFK Recovery	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent-Prozess
Vermiedene Koks-Produktion durch CFK Recovery	1 667	100%	-1667	coke production (RoW)
Vermeidung der Produktion von Ton-Erden durch GFK Recovery	1 667	65%	-1084	market for clay (RoW)

Vermeidung der Metallproduktion durch Recycling	Gewicht Altstoffe [kg]	Verhältnis erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt- Rohstoff [%]	Gewicht vermiedener Rohstoffe [kg]	ecoinvent Prozess
Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	1 750	91%	-1 593	steel production, converter, low-alloyed (RER)
Vermeidung von Gusseisen	17 800	91%	-16 207	cast iron production (RER)
Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	60	76%	-45,8	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)

7.7 Materialspezifische Recycling- und Recovery-Prozesse

Recycling von Stählen & Gusseisen

Für das Recycling von Stählen und Gusseisen wird das dem Anlagenstandort nächstgelegene Recycling-Werk der Voestalpine Stahl Donawitz GmbH in der Steiermark verwendet, wo diese Alt-Eisenmaterialien zu Sekundär-Stahl- und Sekundär-Gusseisen-Barren weiterverarbeitet werden. Eine exakte Modellierung für das Stahlrecycling durch ecoinvent-Aktivitäten ist nur für niedrig legierte Stähle möglich, für hochlegierte Stähle sowie für Gusseisen sind keine genauen ecoinvent-Aktivitäten vorhanden, weshalb deren vollständige Modellierung sehr aufwendig ist. Stattdessen werden wie in Lebenszyklusanalysen für solche Fälle üblich, ähnliche stellvertretende Prozesse gewählt, um das Recycling hochlegierter Stähle und Gusseisen zu modellieren (Gradin & Björklund, 2021). Es wird davon ausgegangen, dass alle drei genannten Eisenmetalle sortenrein bereits vom Anlagenstandort bzw. in dessen Umfeld gesammelt und zum Ort des Recyclings abtransportiert werden.

Für das Recycling niedrig legierter Stähle wird der ecoinvent-Prozess *‘steel production, electric, low-alloyed (AT)’* (ecoinvent Association, 2024) verwendet. Dabei werden für die Herstellung von 1 kg niedrig legiertem Sekundär-Stahl 1,0983 kg niedrig legierter Stahl-Schrott benötigt. Das Verhältnis des erzeugter Sekundärrohstoffs zu Alt-Rohstoff liegt damit bei 91 %. Weiters werden dadurch 1 kg der marktüblichen Produktion von niedrig legiertem Stahl in Europa entsprechend dem ecoinvent-Prozess *‘steel production, converter, low-alloyed (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) vermieden.

Hochlegierter Stahl wird üblicherweise gesammelt und zu hochlegiertem Sekundärstahl recycelt (EuRIC AISBL, 2020). Für die marktübliche Herstellung hochlegierter Stähle in Europa wird somit der repräsentative ecoinvent-Prozess *‘steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) verwendet. Dieser Prozess beinhaltet die Verwendung von Stahlschrott sowie von weiteren Zusätzen (z. B. Ferronickel und Ferrochrom), die zu hochlegiertem Stahl verarbeitet werden. Der Energieaufwand bei der Produktion von hochlegiertem Recycling-Stahl in den USA betrug rund 26 000 MJ/t (Johnson et al., 2008). Der ecoinvent-Prozess *‘steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) resultiert in einem spezifischen Gesamtenergieverbrauch (Cumulative Energy Demand) von 74 000 MJ/t. Der gesamte Energieaufwand bei der Herstellung von hochlegiertem Recycling-Stahl errechnet sich aus dem Verhältnis dieser Daten zu 0,351 der marktüblichen Herstellung von hochlegiertem Stahl. In dieser Arbeit wird aufgrund der mangelnden Daten angenommen, dass sich dieses Verhältnis auch grob entlang der anderen Einflusskategorien skaliert, nachdem davon ausgegangen werden kann, dass CED und GWP als Indikatoren für grobe

Abschätzungen von Umweltauswirkungen herangezogen werden können (Huijbregts et al., 2010; Thibaut & Hache, 2024). Demnach wird das Recycling von hochlegiertem Stahl in der vorliegenden Lebenszyklusanalyse ebenfalls durch die Verwendung des für Europa marktüblichen ecoinvent-Produktionsprozesses *‘steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) abgebildet, wobei die Inputs mit dem eben definierten Skalierungsfaktor von 0,351 gesenkt werden. Daraus folgt entsprechend der getroffenen Annahme, dass alle Umweltauswirkungen mit demselben Skalierungsfaktor gesenkt werden. Schließlich werden entsprechend dem ecoinvent-Prozess *‘steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) zur Erzeugung von 1 kg hochlegiertem Sekundär-Stahl 1,1355 kg Altmetalle verbraucht. Wendet man nun den Skalierungsfaktor von 0,351 an, so wird die Produktion von 1 kg hochlegiertem Sekundär-Stahl vereinfacht durch 0,3986 kg (entspricht gerundet 40 %) *‘steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) modelliert. Durch die Erzeugung von 1 kg hochlegiertem Sekundär-Stahl wird die in Europa marktübliche Produktion von 1 kg hochlegiertem Stahl entsprechend dem ecoinvent-Prozess *‘steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) vermieden.

Auch Gusseisen wird in Europa üblicherweise sortenrein gesammelt und zu Sekundär-Gusseisen recycelt (Monteleone et al., 2024). Im ecoinvent-Prozess zur marktüblichen Herstellung von Gusseisen in Europa *‘cast iron production (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) wird davon ausgegangen, dass 35 % Eisen-Schrott und 65 % Roheisen als Ausgangsmaterialien dienen. Für das Recycling von Gusseisen hingegen existiert ebenfalls keine ecoinvent-Aktivität, weshalb auch hierfür ein stellvertretender Prozess verwendet wird. Niedrig legierte Stähle und Gusseisen werden üblicherweise in gemeinsamen oder ähnlichen Prozessen miteinander oder separat recycelt (Mitterpach et al., 2017). In dieser Diplomarbeit wird daher davon ausgegangen, dass für das Recycling von Gusseisen näherungsweise der für das Recycling von niedrig legiertem Stahl verwendete ecoinvent-Prozess *‘steel production, electric, low-alloyed (AT)’* (ecoinvent Association, 2024) verwendet werden kann. Dabei werden für 1 kg Sekundär-Gusseisen 1,0983 kg Schrott benötigt. Das Verhältnis des erzeugter Sekundärrohstoffs zu Alt-Rohstoff liegt damit wieder bei 91 %. Weiters werden dadurch 1 kg der marktüblichen Produktion von Gusseisen in Europa entsprechend dem ecoinvent-Prozess *‘cast iron production (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) vermieden.

Die Produktionsprozesse in ecoinvent berücksichtigen bereits einen für die gewählte Region üblichen Anteil an Recyclingmaterialien. So wird beispielsweise im Produktionsprozess *‘steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)’* (ecoinvent Association, 2024) berücksichtigt, dass Roheisen als auch geringe Anteile an Stahl-Schrott und weitere Materialien als Input dienen.

Mit Ausnahme des Armierungsstahls im Fundament wird davon ausgegangen, dass alle Stähle und Gusseisen direkt vom Anlagenstandort in Poysdorf-Wilfersdorf (Niederösterreich) zur Voestalpine in Donawitz (Steiermark) transportiert werden.

Für das Recycling aller Eisenmetallen (Stähle und Gusseisen) werden die Materialien zur Voestalpine Stahl Donawitz GmbH in die Steiermark geliefert, wo sie eingeschmolzen und zu Sekundär-Stählen bzw. Sekundär-Gusseisen weiterverarbeitet werden.

Recycling von Aluminium

Für das Recycling von Aluminium sowie für dessen marktübliche Produktion wird auf vorhandenen ecoinvent-Aktivitäten zurückgegriffen. Beim Recyclingprozess von Aluminium lässt sich aus den ecoinvent-Prozess *'treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner (RER)'* (ecoinvent Association, 2024) folgern, dass für die Herstellung von 1 kg Sekundäraluminium 1,0302 kg Aluminium-Schrott nötig sind. Das Verhältnis des erzeugter Sekundärrohstoffs zu Alt-Rohstoff liegt damit bei 97 %. Durch die Herstellung von 1 kg Sekundär-Aluminium wird die marktübliche Produktion von 1 kg Aluminium entsprechend des ecoinvent-Prozesses *'aluminium production, primary, cast alloy slab from continuous casting (RoW)'* (ecoinvent Association, 2024) vermieden.

Es wird angenommen, dass Aluminium von der AMAG Austria Metall AG in Ranshofen (OÖ), dem den Anlagenstandort nächsten Aluminium-Recycler, zu Sekundär-Aluminium verarbeitet, die Transportprozessen beziehen sich daher auf diesen Standort.

Recycling von Kupfer

Für das Recycling von Kupfer wird davon ausgegangen, dass Kupferschrott mit 88 % bis 99 % Kupferanteil durch Feuerraffination und Anodengießen zu Kathodenmaterial mit über 99,99 % Reinheit vergossen wird (Steinacker et al., 2015). Aus dem ecoinvent-Prozess für die Herstellung von Sekundärkupfer *'treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)'* (ecoinvent Association, 2024) ist erkennbar, dass für die Herstellung von 1 kg Kupfer (in Kathoden-Qualität) 1,31 kg Kupferschrott benötigt werden. Das Verhältnis des erzeugter Sekundärrohstoffs zu Alt-Rohstoff liegt somit bei 76 %.

Kupfer wird von der Münzer Bioindustrie GmbH in Sinabelkirchen (Steiermark) in der Nähe von Graz zu Sekundär-Kupfer verarbeitet, die Transportdistanzen beziehen sich daher auf diesen Standort. Dieser Standort ist der dem Anlagenstandort nächste Kupferschrott-verarbeitende Betrieb.

Recycling von GFK

Laut eines Berichts des Deutschen Umweltbundesamtes (2022) kommen für das Recycling von Glasfaser-Verbundwerkstoffen nur mechanische Prozesse mit einem kommerziell verfügbaren technologischen Reifegrad von 9 in Frage. Alle weiteren ausführlich gelisteten Verfahren haben Technologiereifegrad von 6 oder weniger und sind somit in der Betrachtung im Rahmen dieser Diplomarbeit ausgeschlossen (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Laut dem Deutschen Umweltbundesamt (2022) wird beim mechanischen Recycling von GFK das Rezyklat häufig in Sheet Moulding Compound (SMC) Anwendungen weiterverarbeitet, daher wird in der vorliegenden Diplomarbeit diese Anwendung des mechanischen Recyclings betrachtet. Die Betrachtung des GFK-Recyclings reicht vom Antransport des GFK-Materials vom Standort der Windkraftanlage bis zur Bereitstellung als Rohstoff für die weitere SMC-Verarbeitung sowie die dadurch bewirkte Vermeidung von Füllstoff und Glasfasern. Die Produktion von SMC-Erzeugnissen ist nicht Teil dieser Betrachtung.

Als nächster Ort für das GFK-Recycling wurde die Eurecum GmbH & Co. KG in Lutherstadt Eisleben (Sachsen-Anhalt, Deutschland) identifiziert, diese wird durch einen Lkw-Transport von 615 km erreicht.

Die im Gondelgehäuse und in den Rotorblättern enthaltenen GFK-Materialien werden nach dem Antransport in Schneidmühlen auf 50–100 mm vorzerkleinert und in Hammermühlen auf 10 mm oder sogar kleiner als 50 µm feinerzerkleinert. Die spezifischen Energieverbräuche in Schneidmühlen bzw. Hammermühlen belaufen sich dabei auf 2,01 MJ/kg (arithmetisches Mittel aus 0,13; 0,37 und 5,53 MJ/kg) bzw. auf 0,14 MJ/kg elektrischer Energie. Diese werden mit dem ecoinvent-Prozess *‘market for electricity, high voltage (AT)’* (ecoinvent Association, 2024) berücksichtigt, da diese Maschinen meist elektrisch betrieben werden (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Üblicherweise werden bei SMC Anwendungen Kreide oder Gesteinsmehl als Füllstoff verwendet, um Produktionskosten zu sparen. Wird nun 1 kg GFK-Rezyklat aus mechanischem Recycling beigemischt, so werden dadurch 0,62 kg Füllstoff und 0,38 kg Glasfasern substituiert (Deutsches Umweltbundesamt, 2022). Dies wird entsprechend durch die Vermeidung der ecoinvent-Aktivitäten *‘market for calcium carbonate, precipitated (ReR)’* und *‘market for glass fibre (GLO)’* modelliert (ecoinvent Association, 2024).

Recover von GFK

Für die Verwertung von GFK ist die Verarbeitung in Zementwerken üblich und gegenüber der Verwertung in Müllverbrennungsanlagen aus ökologischer Sicht zu bevorzugen (Deutsches Umweltbundesamt, 2022). Das vom Anlagenstandort

nächstgelegene Zementwerk, in dem eine Verwertung von GFK-Abfällen durchgeführt wird, ist das Zementwerk der Firma Holcim GmbH in Längendorf (Deutschland), wo das GFK über eine Strecke von 962 km vom Anlagenstandort per Lkw angeliefert wird.

Das GFK-Material wird dabei nach dem Antransport mit einer Schneidmühle mit einem spezifischen elektrischen Energiebedarf von 2,01 MJ/kg (arithmetisches Mittel von 0,13; 0,37 und 5,53 MJ/kg) in Stücke bis 40 mm zerkleinert und dadurch für die weitere Verwertung vorbereitet (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Die Systemgrenze in der Betrachtung der Verwertung von GFK-Abfällen in dieser Diplomarbeit endet mit der Bereitstellung von Wärmeenergie aus dem Epoxidharz (als Substitut von Steinkohle) und der Bereitstellung von Glasfasern (als Substitut von Ton-Erden). Beides wird in der Produktion von Zementklinker benötigt. Eine vollständige Betrachtung der Herstellung von Zementklinker ist im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht zielführend, da sich die Systemgrenzen nur schwer mit der Vielfalt an vorkommenden Prozessen und Materialflüssen aufzeigen lässt (Deutsches Umweltbundesamt, 2022; Pillain et al., 2019)

Beim Verwertungsprozess von GFK in Zementwerken wird das Epoxidharz vollständig verbrannt, es wird angenommen, dass der Verbrennungsprozess des Epoxidharz-Anteils (35 % des GFK, vgl. Anhang 7.1) aus Umweltsicht mit dem Verbrennungsprozess von Kunststoffen in Müllverbrennungsanlagen vergleichbar ist, somit wird die Verbrennung vom Epoxidharz im ActivityBrowser durch den ecoinvent-Prozess *„treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)“* (ecoinvent Association, 2024) zur Gewinnung von prozessinterner Wärmeenergie abgebildet. Die daraus entstandene thermische Energie verringert dieselbe thermische Energie durch die übliche Verbrennung von Steinkohle in Zementwerken, wodurch näherungsweise der ecoinvent-Prozess *„heat and power co-generation, hard coal (DE)“* (ecoinvent Association, 2024) vermieden wird (Pillain et al., 2019).

Die aus den Glasfasern verbleibenden Rückstände im Zementklinker können verwendet werden, um den Einsatz von chemisch sehr ähnlichen Ton-Erden zu verringern (Deutsches Umweltbundesamt, 2022). Es wird angenommen, dass eine definierte Menge an Glasfasern dieselbe Menge an Ton-Erden ersetzt. Dadurch wird die Herstellung von Ton anhand des ecoinvent-Prozesses *„market for clay (RoW)“* (ecoinvent Association, 2024) vermieden.

Recycling CFK

Wie in einem Bericht des Deutschen Umweltbundesamtes (2022) beschrieben, steht für das Recycling von Karbonfaser-Verbundwerkstoffen nur die Pyrolyse als kommerziell verfügbare großtechnische Lösung mit einem technologischen Reifegrad von 9 zur Verfügung. Die bei der Pyrolyse von CFK benötigte Energie beträgt etwa

10–15 % der für die Herstellung neuer Karbonfasern benötigten Energie (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Es wird davon ausgegangen, dass die verwendete Pyrolyse-Anlage im norddeutschen Wischhafen, dem Anlagenstandort nächsten Pyrolyse-Anbieter, betrieben wird und die CFK-Abfälle dorthin über eine Strecke von 968 km per Lkw transportiert werden.

Die nach der baustellenseitigen Zerkleinerung mit einer Diamantkreissäge (siehe Kapitel 5.3.1) antransportierten CFK-Teile werden zunächst mit einer Schneidemühle weiter zerkleinert, dieser Prozess hat lt. Deutschem Umweltbundesamt (2022) einen Energiebedarf von 0,27–2,03 MJ/kg CFK, in dieser Diplomarbeit wird das arithmetische Mittel mit 1,15 MJ/kg elektrischer Energie gewählt und dafür der Ecoinvent-Prozess *‘market for electricity, high voltage (AT)’* (ecoinvent Association, 2024) verwendet (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Karbonfaserverstärkte Kunststoffe bestehen im vorliegenden Fall wie bei der Erstellung der Stückliste besprochen aus Epoxidharz und Karbonfasern. Bei dem Pyrolyse-Prozess dieses Verbundwerkstoffes wird das Epoxidharz in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre und bei bis zu 900 °C in flüssige, gasförmige und feste Restbestandteile zersetzt, die Karbonfasern zeigen dabei neben geringen Qualitätsverlusten keine Reaktion. Es wird wie im Bericht des Deutschen Umweltbundesamtes (2022) und von Pillain et al. (2019) davon ausgegangen, dass die entstandenen gasförmigen und flüssigen Bestandteile bereits im Prozess thermisch verwertet werden und die festen Bestandteile in vernachlässigbaren Mengen verbleiben (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Zusammengefasst werden Karbonfaserverbundwerkstoff unter Zufuhr von 28 MJ elektrischer Energie mit der ecoinvent-Aktivität *‘market for electricity, high voltage (AT)’* und von 0,646 kg Stickstoff mit der ecoinvent-Aktivität *‘market for nitrogen, liquid (RER)’* je kg CFK zu recycelten Karbonfasern verarbeitet, dabei wird von Pender et al. (2024) angenommen, dass 95 % der im CFK vorkommenden Karbonfasern zu Sekundär-Karbonfasern recycelt werden können (ecoinvent Association, 2024; Pillain et al., 2019). Die aus dem Epoxidharz entstehenden Prozessgase und -öle werden dabei bereits thermisch im Pyrolyse-Prozess verwertet, wodurch hauptsächlich CO₂-Emissionen entstehen. Aus der Literatur lässt sich die Menge der entstehenden Emissionen nicht quantifizieren, weshalb hier angenommen wird, dass der gesamte im Epoxidharz vorkommende chemisch gebundene Kohlenstoff zu CO₂ reagiert. Bisphenol A mit einer chemischen Summenformel von C₂₁H₂₄O₄ ist eines der am häufigsten verwendeten Epoxidharzen für Windenergieanlagen, weshalb es in der vorliegenden Betrachtung verwendet wird (Epoxy Resin Committee, 2015). Durch Berücksichtigung der molaren Massen auf die in der Summenformel gegebenen Mengen ergibt sich, dass 1 kg Bisphenol A aus 740 g Kohlenstoff besteht. Bei dem in Anhang 7.1 definierten Faseranteil von 65 % verbleiben in 1 kg CFK somit 259 g

thermisch verwertbarer Kohlenstoff. Unter der Berücksichtigung der molaren Massen reagiert der Kohlenstoff je kg CFK somit zu 945 g CO₂ und wird in Form von Emissionen frei. Hierfür wurde ein eigenständiger Prozess im ActivityBrowser angelegt mit der Bezeichnung ‚Carbon Dioxide Emissions‘. Dieser kann als stellvertretender Dummy-Prozess betrachtet werden und berücksichtigt ausschließlich CO₂-Emissionen in die bodennahe Atmosphäre (Pender et al., 2024).

Für die Berechnung der vermiedenen Primärproduktion von Karbonfasern wird von Pender et al. (2024) ein Verringerungsfaktor von 11,4 % übernommen. Dieser besagt, dass durch die Herstellung einer Einheit recycelter Karbonfasern (1 – Verringerungsfaktor) Einheiten neue Karbonfasern vermieden werden (Pender et al., 2024).

Recover CFK

Bei der Verwertung von CFK ist laut dem Deutschen Umweltbundesamt (2022) die Karbid-Route mit einem Technologiereifegrad von 7–8, also der Herstellung von Kalziumkarbid (CaC₂), gegenüber der Verwertung in Müllverbrennungsanlagen zu bevorzugen. CaC₂ dient als Grundstoff für die Düngemittelproduktion sowie zur Herstellung von Acetylgas. Die fast ausschließlich aus Kohlenstoff bestehenden Karbonfasern sowie die Kunststoffe wie das vorkommende Epoxidharz werden im Prozess verwendet, um den Einsatz von Schwarzkohlen (Kohle und Koks) zu verringern (Deutsches Umweltbundesamt, 2022).

Es wird davon ausgegangen, dass die CFK-Materialien dabei per Lkw über eine Strecke von 387 km von Wilfersdorf (Niederösterreich) zum Produktionsstandort der Firma AlzChem in Hart (Bayern, Deutschland), der nächstgelegenen Möglichkeit transportiert werden.

Die nach der baustellenseitigen Zerkleinerung antransportierten CFK-Teile werden zunächst mit einer Schneidemühle weiter zerkleinert, dieser Prozess hat lt. Deutschem Umweltbundesamt (2022) einen Energiebedarf von 0,27–2,03 MJ/kg CFK, in der vorliegenden Diplomarbeit wird erneut das arithmetische Mittel mit 1,15 MJ/kg elektrischer Energie gewählt und der ecoinvent-Prozess ‚*market for electricity, high voltage (AT)*‘ (ecoinvent Association, 2024) verwendet. Das entstandene Material weist dabei einen sehr hohen Kohlenstoffgehalt auf und es wird angenommen, dass es die gleiche Menge an Koks im Prozess der Kalziumkarbid-Herstellung ersetzt wird. Der dafür vermiedene ecoinvent-Prozess lautet ‚*coke production (RoW)*‘ (Deutsches Umweltbundesamt, 2022; ecoinvent Association, 2024).

Recycling verbleibender Polymere

Von den verbleibenden Polymeren der Vestas V90-2MW Windkraftanlage wurden von Garrett & Rønde (2011) mit 71 % ein überwiegender Großteil den thermoplastischen

Kunststoffen zugeordnet. Aufgrund der fehlenden Daten für die genaue Zusammensetzung der verbleibenden Kunststoffe in Windkraftanlagen wird stellvertretend davon ausgegangen, dass jeweils 50 % der Polymere recycelbar bzw. nicht recycelbar sind, da ein vollständiges Recycling der Kunststoffe aufgrund der potenziellen Vielfalt der eingesetzten Materialien unrealistisch ist. Es wird hierbei nur mechanisches und kein chemisches Recycling der Kunststoffe betrachtet.

Es wird angenommen, dass die Kunststoff-Abfälle in Sortiermaschinen in der Gegend von Wien sortenrein aufbereitet, getrennt, zerkleinert, gewaschen und getrocknet werden. Der ecoinvent-Prozess *„treatment of waste plastic, mixed, recycling (ReR)“* (ecoinvent Association, 2024) beschreibt genau diese Vorgänge, wobei aus 1,1408 kg gemischten Kunststoffabfällen 1 kg verschiedene sortenreine Kunststoff-Flocken hergestellt werden, somit ergibt sich ein Verhältnis vom erzeugter Sekundärrohstoff zu Alt-Rohstoff von 88 %.

Für den recycelbaren Anteil (50 % der aufbereiteten und getrennten Kunststoffabfälle) der Polymere wird stellvertretend davon ausgegangen, dass es sich um Polyethylen (PE) handelt, da dieses einer der wichtigsten thermoplastischen Materialien für technische Anwendungen zählt und somit repräsentativ für recycelbare Kunststoffe ist. In kleinen Mengen kann recyceltes PE der Produktion zugeführt werden ohne merkliche Qualitätsverluste, daher wird in dieser Diplomarbeit davon ausgegangen, dass die PE-Flocken dieselbe Menge an neuwertigem PE im ecoinvent-Prozess *„polyethylene production, high density, granulate (ReR)“* vermeiden (ecoinvent Association, 2024; Ruge & Wohlfahrt, 2013).

Für die nicht-recycelbaren Materialien (50 % der aufbereiteten und getrennten Kunststoffabfälle), wird zur Vervollständigung der Szenarien davon ausgegangen, dass sie mit den ecoinvent-Prozessen *„treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)“* (ecoinvent Association, 2024) in Müllverbrennungsanlagen für die Wärme- und Stromerzeugung verwertet werden. Dabei handelt es sich um zwei gekoppelte ecoinvent-Aktivitäten mit demselben Namen, aber unterschiedlichen Erzeugnissen. Es geht hervor, dass bei der thermischen Verwertung von 1 kg gemischten Kunststoffabfälle 3,93 MJ elektrische und 7,67 MJ thermische Energie gewonnen werden. Dadurch werden die Produktion von Wärme entsprechend der ecoinvent-Aktivität *„market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)“* sowie die Produktion von Elektrizität entsprechend der ecoinvent-Aktivität *„market for electricity, high voltage (AT)“* vermieden (ecoinvent Association, 2024).

Recover verbleibender Polymere

Wie bereits zuvor beim Recycling der verbleibenden Polymere wird hier die Quote thermisch verwerteter Kunststoffabfälle von 50 auf 100 % erhöht und ebenfalls mit dem

ecoinvent-Prozess *„treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)“* (ecoinvent Association, 2024) in Müllverbrennungsanlagen für die Wärme- und Elektrizitätsgewinnung verwertet. Die für das Recycling zuvor notwendige Trennung in sortenreine Fraktionen entfällt hier, dadurch wird die Produktion von Wärme und Strom entsprechend der ecoinvent-Prozesse *„market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)“* und *„market for electricity, high voltage (AT)“* vermieden (ecoinvent Association, 2024).

Der Ort der nächstgelegenen Müllverbrennungsanlage ist im 12 km vom Anlagenstandort gelegenen Zistersdorf (Niederösterreich), Transporte beziehen sich entsprechend darauf.

Recycling des Schmieröls

Für das Recycling des Schmieröls des Getriebes wird dieses zunächst zur Münzer Bioindustrie GmbH in Wien über eine Strecke von 59 km transportiert und dort weiter behandelt.

Bei der Aufbereitung von Schmierölen lässt sich zusammenfassend erkennen, dass Filter-Prozesse, verschiedene Destillationsstufen sowie der Einsatz von Propan zur Herstellung von Recyclingschmierölen zum Einsatz kommen. Botas et al. (2017) beziffern den externen Verbrauch von Energieressourcen je kg recyceltem Schmieröl mit 1,151 MJ Wärme aus der Verbrennung von Erdgas, 1,007 MJ Elektrizität sowie 0,317 MJ Propanenergie. Somit sind für die Aufwendung der Propanenergie bei einem Heizwert von 46,4 MJ/kg für jedes kg recyceltem Schmieröl 6,83 g Propan nötig. Die Wärmeenergie wird durch den ecoinvent-Prozess *„heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)“*, die elektrische Energie mit *„market for electricity, high voltage (AT)“* und die Bereitstellung von Propan mit *„market for propane (GLO)“* modelliert (Botas et al., 2017; ecoinvent Association, 2024).

Für die Herstellung von 1 kg Recyclingschmierstoffe werden 1,474 kg Altöl verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass die verbleibenden 0,474 kg (32,16 %) Kohlenwasserstoffe weiters zur Erzeugung von prozessinterner Wärme verbrannt und genutzt werden. Dieses Vorgehen wird näherungsweise durch den ecoinvent-Prozess *„heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW“* (ecoinvent Association, 2024) beschrieben, der davon ausgeht, dass für die Produktion von 1 MJ Wärmeenergie 0,02593 kg schweres Heizöl verwendet werden. Daraus ergibt sich ein Heizwert von 38,56 MJ/kg (Botas et al., 2017).

Durch die Produktion von Recyclingschmierstoffen wird die Herstellung von neuem Schmieröl anhand des ecoinvent-Prozesses *„lubricating oil production (ReR)“* (ecoinvent Association, 2024) vermieden.

7.8 Ergebnisse des Lifecycle Impact Assessments (LCIA) und Daten der Sensitivitätsanalyse

Tabelle 7.18: Ergebnisse des Lifecycle Impact Assessments (LCIA) und Daten der Sensitivitätsanalyse

					LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
					GWP	AP	EP	POF	Lebens- dauer	Ausfall- quoten	Trans- port	Montage- tätig- keiten	Material- verwert- ung
Kat.	Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Ethylen- Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung					-1866155,97	-4661,79	-6723,02	-319,29					
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-776895,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-1866155,97	-4661,79	-6723,02	-319,29	1	0	0	0	0
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung					-4328974,04	-10814,08	-15595,58	-740,67					
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-18021850,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-4328974,04	-10814,08	-15595,58	-740,67	1	0	0	0	0
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung					-3319378,27	-8239,80	-12080,10	-565,44					
a	Montage und Hub Ersatzteile (Getriebe, Generator, Schmieröl in 10 J)	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	3,31	0,02	0,01	0,00	1	1	0	1	0
a	Demontage und Hub Ersatzteile	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	3,31	0,02	0,01	0,00	1	1	0	1	0
b	Hochlegierter Stahl	1418,00	kg	metal working, average for chromium steel product manufacturing (RER)	3230,63	12,54	11,19	0,79	1	1	0	0	0
b	Gusseisen	5525,00	kg	market for cast iron (GLO)	10091,38	33,17	17,35	4,59	1	1	0	0	0
b	Kupfer	415,00	kg	metal working, average for copper product manufacturing (RER)	1088,80	47,50	15,93	2,01	1	1	0	0	0
b	Schmieröl	1087,00	kg	market for lubricating oil (RER)	1682,98	6,26	5,67	0,61	1	0	0	0	0
c	Hintransport neues Getriebe & Generator (Schiff)	10855,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	110,60	2,61	0,30	0,13	1	1	1	0	0
c	Hintransport neues Getriebe & Generator (Zug)	8510,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	393,93	2,23	0,92	0,17	1	1	1	0	0
c	Hintransport neues Getriebe & Generator (LKW)	1281,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	237,75	0,41	0,17	0,04	1	1	1	0	0
c	Hintransport neues Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	122,33	0,43	0,17	0,06	1	0	1	0	0
c	Transport Wartungsteam	432,00	km	internal combustion engine, fleet average (RER)	157,39	0,43	0,34	0,04	1	0	1	0	0
c	Transport Stahl (hochlegiert)	306,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	56,79	0,10	0,04	0,01	1	1	1	0	0
c	Transport Gusseisen	1193,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	221,42	0,38	0,16	0,04	1	1	1	0	0
c	Transport Kupfer	144,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	26,73	0,05	0,02	0,00	1	1	1	0	0
c	Abtransport altes Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	122,33	0,43	0,17	0,06	1	0	1	0	0
d	Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	565,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)	2597,55	12,51	12,03	0,74	1	1	0	0	1
d	Recycling des Gusseisens	5031,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	1639,70	7,45	3,83	0,45	1	1	0	0	1
d	Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	317,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	539,92	27,49	5,79	1,17	1	1	0	0	1
d	Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	849,00	MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)	65,95	0,05	0,02	0,01	1	0	0	0	1
d	Zufuhr von elektrischer Energie	206,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	49,48	0,12	0,18	0,01	1	0	0	0	1
d	Verbrauch von Propanas	5,04	kg	market for propane (GLO)	5,04	0,01	0,01	0,00	1	0	0	0	1
d	Verbrennung von Kohlenwasserstoffen	13477,00	MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW (Europe without Switzerland)	1371,52	8,21	0,38	0,43	1	0	0	0	1
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-13846700,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-3326073,90	-8308,76	-11982,53	-569,08	1	0	0	0	0
e	Vermeidung von hochlegiertem Stahl	-1291,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)	-5935,28	-28,59	-27,49	-1,69	1	1	0	0	0
e	Vermeidung von Gusseisen	-5031,00	kg	cast iron production (RER)	-8007,22	-24,26	-16,10	-3,87	1	1	0	0	0
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-317,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-2147,41	-36,78	-125,13	-1,80	1	1	0	0	0
e	Vermeidung Herstellung Schmieröl	-680,00	kg	lubricating oil production (RER)	-1033,31	-3,84	-3,53	-0,38	1	0	0	0	0
Szenario 1.4) Rotor & Lebensdauererweiterung					-3168945,90	-7909,55	-11416,85	-541,74					
a	Montage und Hub Ersatzteile (Rotorblätter)	5,76	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	0,58	0,00	0,00	0,00	1	1	0	1	0
a	Demontage und Hub Ersatzteile	5,76	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	0,58	0,00	0,00	0,00	1	1	0	1	0
a	Zerschneiden des Rotorblattes	449,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	44,96	0,28	0,07	0,02	1	1	0	1	0
b	Niedrig legierter Stahl	128,00	kg	metal working, average for steel product manufacturing (RER)	207,09	0,65	0,54	0,06	1	1	0	0	0
b	Glasfaser (in GFK)	771,00	kg	market for glass fibre (GLO)	1912,22	11,86	6,13	0,64	1	1	0	0	0
b	Epoxidharz (in CFK)	42,80	kg	market for epoxy resin, liquid (RER)	217,63	0,67	1,02	0,06	1	1	0	0	0
b	Epoxidharz (in GFK)	415,00	kg	market for epoxy resin, liquid (RER)	2110,23	6,53	9,93	0,63	1	1	0	0	0

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
				GWP	AP	EP	POF	Lebens- dauer	Ausfall- quoten	Trans- port	Montage- tätig- keiten	Material- verwert- ung
				[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Äthylen- Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%
b Kupfer	4,40	kg	metal working, average for copper product manufacturing (RER)	11,54	0,50	0,17	0,02	1	1	0	0	0
b Sonstige Polymere	24,90	kg	market for polyvinylidenchloride, granulate (RER)	124,19	0,68	0,08	0,04	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	2695,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	934,94	2,72	0,64	0,18	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	914,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	380,13	1,58	0,88	0,09	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	28633,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)	2153,79	1,34	0,47	0,18	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	2655,00	kWh	market for electricity, medium voltage (JP)	1668,01	6,48	3,43	0,35	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	159,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	671,05	2,41	11,96	0,13	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	1,59	kg	market for vinyl acetate (RoW)	6,97	0,02	0,38	0,00	1	1	0	0	0
c Hintransport neues Rotorblatt (Zug)	103,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	4,77	0,03	0,01	0,00	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Rotorblatt (Schiff)	337,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	3,43	0,08	0,01	0,00	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Rotorblatt (Schubverband)	2200,00	tkm	market for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (RER)	110,98	0,69	0,22	0,05	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Rotorblatt (LKW)	107,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	10,82	0,02	0,01	0,00	1	1	1	0	0
c Abtransport zerkleinertes Rotorblatt	89,50	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	16,61	0,03	0,01	0,00	1	1	1	0	0
c Transport Wartungsteam	432,00	km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)	157,39	0,43	0,34	0,04	1	0	1	0	0
c Transport Stahl (niedrig legiert)	27,70	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	5,14	0,01	0,00	0,00	1	1	1	0	0
c Transport Kupfer	1,53	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	0,28	0,00	0,00	0,00	1	1	1	0	0
c Transport Polymere	1,52	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	0,28	0,00	0,00	0,00	1	1	1	0	0
c Transport GFK	730,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	135,49	0,23	0,10	0,02	1	1	1	0	0
c Transport CFK	118,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	21,90	0,04	0,02	0,00	1	1	1	0	0
d Stahl (niedrig legiert)	117,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	38,13	0,17	0,09	0,01	1	1	0	0	1
d Kupfer	3,36	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	5,72	0,29	0,06	0,01	1	1	0	0	1
d Aufbereitung sonstiger Polymerabfälle	21,90	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)	21,77	0,03	0,06	0,00	1	1	0	0	1
d Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	12,00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-8,86	0,00	0,00	0,00	1	1	0	0	1
d Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	84,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-17,29	0,00	0,00	0,00	1	1	0	0	1
d Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	663,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	159,26	0,40	0,57	0,03	1	1	0	0	1
d Feinzerkleinerung in Hammermühle	46,20	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	11,10	0,03	0,04	0,00	1	1	0	0	1
d Zerkleinerung in Schneidmühlen	39,10	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	9,39	0,02	0,03	0,00	1	1	0	0	1
d Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	951,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	228,44	0,57	0,82	0,04	1	1	0	0	1
d Stickstoffverbrauch Pyrolyse	79,00	kg	market for nitrogen, liquid (RER)	14,94	0,06	0,05	0,00	1	1	0	0	1
d CO ₂ -Emissionen der Pyrolyse	116,00	kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions	116,00	0,00	0,00	0,00	1	1	0	0	1
e Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-13212500,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-3173734,63	-7928,21	-11433,71	-543,01	1	0	0	0	0
e Vermeidung von Wärmeproduktion	-83,80	MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	-4,59	0,00	0,00	0,00	1	1	0	0	0
e Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-11,90	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-2,86	-0,01	-0,01	0,00	1	1	0	0	0
e Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-106,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-227,97	-0,76	-0,66	-0,10	1	1	0	0	0
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-2,56	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-17,34	-0,30	-1,01	-0,01	1	1	0	0	0
e Vermeidung Kreide (durch GFK)	-478,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (RER)	-183,36	-0,79	-0,25	-0,11	1	1	0	0	0
e Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-293,00	kg	market for glass fibre (GLO)	-726,69	-4,51	-2,33	-0,24	1	1	0	0	0
e Vermeidung der Primärproduktion von PE	-5,46	kg	polyethylene production, high density, granulate (RER)	-12,30	-0,03	-0,03	0,00	1	1	0	0	0
e Herstellung von Karbonfasern	-2560,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	-888,11	-2,59	-0,60	-0,17	1	1	0	0	0
e Herstellung von Karbonfasern	-868,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	-361,00	-1,50	-0,84	-0,08	1	1	0	0	0
e Herstellung von Karbonfasern	-27202,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)	-2046,15	-1,27	-0,45	-0,17	1	1	0	0	0
e Herstellung von Karbonfasern	-2522,00	kWh	market for electricity, medium voltage (JP)	-1584,46	-6,15	-3,25	-0,33	1	1	0	0	0
e Herstellung von Karbonfasern	-151,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	-637,29	-2,29	-11,36	-0,13	1	1	0	0	0

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
				GWP [kg CO ₂ -Äq]	AP [kg SO ₂ -Äq]	EP [kg PO ₄ -Äq]	POF [kg Ethylen-Äq]	Lebens- dauer +50%	Ausfall- quoten +20%	Trans- port +50%	Montage- tätig- keiten +50%	Material- verwert- ung +20%
e Herstellung von Karbonfasern	-2,00	kg	market for vinyl acetate (RoW)	-8,77	-0,03	-0,48	0,00	1	1	0	0	0
Szenario 2.2) Turm & Reuse				-4323526,35	-10803,26	-15591,31	-739,60					
a Montage des Turms	290,38	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	29,07	0,18	0,05	0,01	0	0	0	1	0
a Demontage des Turms	290,38	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	29,07	0,18	0,05	0,01	0	0	0	1	0
c Transport des Turms	53280,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	5389,54	10,45	4,18	1,04	0	0	1	0	0
e Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-18021850,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-4328974,04	-10814,08	-15595,58	-740,67	1	0	0	0	0
Szenario 2.3) Gondel & Reuse				-3316848,57	-8234,67	-12078,10	-564,93					
a Montage der Gondel	266,80	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	26,71	0,17	0,04	0,01	0	0	0	1	0
a Demontage der Gondel	266,80	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	26,71	0,17	0,04	0,01	0	0	0	1	0
a Montage und Hub Ersatzteile (Getriebe, Generator, Schmieröl in 10 J)	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	3,31	0,02	0,01	0,00	1	1	0	1	0
a Demontage und Hub Ersatzteile	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	3,31	0,02	0,01	0,00	1	1	0	1	0
b Hochlegierter Stahl	1418,00	kg	metal working, average for chromium steel product manufacturing (RER)	3230,63	12,54	11,19	0,79	1	1	0	0	0
b Gusseisen	5525,00	kg	market for cast iron (GLO)	10091,38	33,17	17,35	4,59	1	1	0	0	0
b Kupfer	415,00	kg	metal working, average for copper product manufacturing (RER)	1088,80	47,50	15,93	2,01	1	1	0	0	0
b Schmieröl	1087,00	kg	market for lubricating oil (RER)	1682,98	6,26	5,67	0,61	1	0	0	0	0
c Transport der Gondel	24480,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	2476,28	4,80	1,92	0,48	0	0	1	0	0
c Hintransport neues Getriebe & Generator (Schiff)	10855,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	110,60	2,61	0,30	0,13	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Getriebe & Generator (Zug)	8510,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	393,93	2,23	0,92	0,17	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Getriebe & Generator (LKW)	1281,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	237,75	0,41	0,17	0,04	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	122,33	0,43	0,17	0,06	1	0	1	0	0
c Transport Wartungsteam	432,00	km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)	157,39	0,43	0,34	0,04	1	0	1	0	0
c Transport Stahl (hochlegiert)	306,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	56,79	0,10	0,04	0,01	1	1	1	0	0
c Transport Gusseisen	1193,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	221,42	0,38	0,16	0,04	1	1	1	0	0
c Transport Kupfer	144,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	26,73	0,05	0,02	0,00	1	1	1	0	0
c Abtransport altes Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	122,33	0,43	0,17	0,06	1	0	1	0	0
d Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	565,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)	2597,55	12,51	12,03	0,74	1	1	0	0	1
d Recycling des Gusseisens	5031,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	1639,70	7,45	3,83	0,45	1	1	0	0	1
d Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	317,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	539,92	27,49	5,79	1,17	1	1	0	0	1
d Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	849,00	MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)	65,95	0,05	0,02	0,01	1	0	0	0	1
d Zufuhr von elektrischer Energie	206,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	49,48	0,12	0,18	0,01	1	0	0	0	1
d Verbrauch von Propangas	5,04	kg	market for propane (GLO)	5,04	0,01	0,01	0,00	1	0	0	0	1
d Verbrennung von Kohlenwasserstoffen	13477,00	MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW (Europe without Switzerland)	1371,52	8,21	0,38	0,43	1	0	0	0	1
e Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-13846700,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-3326073,90	-8308,76	-11982,53	-569,08	1	0	0	0	0
e Vermeidung von hochlegiertem Stahl	-1291,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)	-5935,28	-28,59	-27,49	-1,69	1	1	0	0	0
e Vermeidung von Gusseisen	-5031,00	kg	cast iron production (RER)	-8007,22	-24,26	-16,10	-3,87	1	1	0	0	0
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-317,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-2147,41	-36,78	-125,13	-1,80	1	1	0	0	0
e Vermeidung Herstellung Schmieröl	-680,00	kg	lubricating oil production (RER)	-1033,31	-3,84	-3,53	-0,38	1	0	0	0	0
Szenario 2.4) Rotor & Reuse				-3167532,24	-7906,68	-11415,73	-541,46					
a Montage des Rotors	149,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	14,93	0,09	0,02	0,01	0	0	0	1	0
a Demontage des Rotors	149,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	14,93	0,09	0,02	0,01	0	0	0	1	0
a Montage und Hub Ersatzteile (Rotorblätter)	5,76	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	0,58	0,00	0,00	0,00	1	1	0	1	0

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
				GWP [kg CO ₂ -Äq]	AP [kg SO ₂ -Äq]	EP [kg PO ₄ -Äq]	POF [kg Ethylen-Äq]	Lebens- dauer +50%	Ausfall- quoten +20%	Trans- port +50%	Montage- tätig- keiten +50%	Material- verwert- ung +20%
a Demontage und Hub Ersatzteile	5,76	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	0,58	0,00	0,00	0,00	1	1	0	1	0
a Zerschneiden des Rotorblattes	449,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	44,96	0,28	0,07	0,02	1	1	0	1	0
b Niedrig legierter Stahl	128,00	kg	metal working, average for steel product manufacturing (RER)	207,09	0,65	0,54	0,06	1	1	0	0	0
b Glasfaser (in GFK)	771,00	kg	market for glass fibre (GLO)	1912,22	11,86	6,13	0,64	1	1	0	0	0
b Epoxidharz (in CFK)	42,80	kg	market for epoxy resin, liquid (RER)	217,63	0,67	1,02	0,06	1	1	0	0	0
b Epoxidharz (in GFK)	415,00	kg	market for epoxy resin, liquid (RER)	2110,23	6,53	9,93	0,63	1	1	0	0	0
b Kupfer	4,40	kg	metal working, average for copper product manufacturing (RER)	11,54	0,50	0,17	0,02	1	1	0	0	0
b Sonstige Polymere	24,90	kg	market for polyvinylidenchloride, granulate (RER)	124,19	0,68	0,08	0,04	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	2695,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	934,94	2,72	0,64	0,18	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	914,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	380,13	1,58	0,88	0,09	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	28633,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)	2153,79	1,34	0,47	0,18	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	2655,00	kWh	market for electricity, medium voltage (JP)	1668,01	6,48	3,43	0,35	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	159,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	671,05	2,41	11,96	0,13	1	1	0	0	0
b Karbonfaser (in CFK)	1,59	kg	market for vinyl acetate (RoW)	6,97	0,02	0,38	0,00	1	1	0	0	0
c Transport des Rotors	13680,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	1383,80	2,68	1,07	0,27	0	0	1	0	0
c Hintransport neues Rotorblatt (Zug)	103,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	4,77	0,03	0,01	0,00	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Rotorblatt (Schiff)	337,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	3,43	0,08	0,01	0,00	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Rotorblatt (Schubverband)	2200,00	tkm	market for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (RER)	110,98	0,69	0,22	0,05	1	1	1	0	0
c Hintransport neues Rotorblatt (LKW)	107,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	10,82	0,02	0,01	0,00	1	1	1	0	0
c Abtransport zerkleinertes Rotorblatt	89,50	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	16,61	0,03	0,01	0,00	1	1	1	0	0
c Transport Wartungsteam	432,00	km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)	157,39	0,43	0,34	0,04	1	0	1	0	0
c Transport Stahl (niedrig legiert)	27,70	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	5,14	0,01	0,00	0,00	1	1	1	0	0
c Transport Kupfer	1,53	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	0,28	0,00	0,00	0,00	1	1	1	0	0
c Transport Polymere	1,52	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	0,28	0,00	0,00	0,00	1	1	1	0	0
c Transport GFK	730,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	135,49	0,23	0,10	0,02	1	1	1	0	0
c Transport CFK	118,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	21,90	0,04	0,02	0,00	1	1	1	0	0
d Stahl (niedrig legiert)	117,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	38,13	0,17	0,09	0,01	1	1	0	0	1
d Kupfer	3,36	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	5,72	0,29	0,06	0,01	1	1	0	0	1
d Aufbereitung sonstiger Polymerabfälle	21,90	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)	21,77	0,03	0,06	0,00	1	1	0	0	1
d Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	12,00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-8,86	0,00	0,00	0,00	1	1	0	0	1
d Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	84,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-17,29	0,00	0,00	0,00	1	1	0	0	1
d Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	663,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	159,26	0,40	0,57	0,03	1	1	0	0	1
d Feinzerkleinerung in Hammermühle	46,20	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	11,10	0,03	0,04	0,00	1	1	0	0	1
d Zerkleinerung in Schneidmühlen	39,10	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	9,39	0,02	0,03	0,00	1	1	0	0	1
d Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	951,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	228,44	0,57	0,82	0,04	1	1	0	0	1
d Stickstoffverbrauch Pyrolyse	79,00	kg	market for nitrogen, liquid (RER)	14,94	0,06	0,05	0,00	1	1	0	0	1
d CO ₂ -Emissionen der Pyrolyse	116,00	kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions	116,00	0,00	0,00	0,00	1	1	0	0	1
e Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-13212500,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-3173734,63	-7928,21	-11433,71	-543,01	1	0	0	0	0
e Vermeidung von Wärmeproduktion	-83,80	MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	-4,59	0,00	0,00	0,00	1	1	0	0	0
e Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-11,90	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-2,86	-0,01	-0,01	0,00	1	1	0	0	0
e Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-106,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-227,97	-0,76	-0,66	-0,10	1	1	0	0	0
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-2,56	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-17,34	-0,30	-1,01	-0,01	1	1	0	0	0
e Vermeidung Kreide (durch GFK)	-478,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (RER)	-183,36	-0,79	-0,25	-0,11	1	1	0	0	0

(Fortsetzung)

Kat.	Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
					GWP	AP	EP	POF	Lebens- dauer	Ausfall- quoten	Trans- port	Montage- tätig- keiten	Material- verwert- ung
					[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Ethylen- Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%
e	Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-293,00	kg	market for glass fibre (GLO)	-726,69	-4,51	-2,33	-0,24	1	1	0	0	0
e	Vermeidung der Primärproduktion von PE	-5,46	kg	polyethylene production, high density, granulate (RER)	-12,30	-0,03	-0,03	0,00	1	1	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-2560,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	-888,11	-2,59	-0,60	-0,17	1	1	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-868,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	-361,00	-1,50	-0,84	-0,08	1	1	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-27202,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)	-2046,15	-1,27	-0,45	-0,17	1	1	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-2522,00	kWh	market for electricity, medium voltage (JP)	-1584,46	-6,15	-3,25	-0,33	1	1	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-151,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	-637,29	-2,29	-11,36	-0,13	1	1	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-2,00	kg	market for vinyl acetate (RoW)	-8,77	-0,03	-0,48	0,00	1	1	0	0	0
Szenario 3.1) Fundament & Repower					-2006126,49	-5011,44	-7227,28	-343,24					
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-8351658,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-2006126,49	-5011,44	-7227,28	-343,24	1	0	0	0	0
Szenario 3.2) Turm & Repower					-4653667,57	-11625,19	-16765,33	-796,22					
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-19373574,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-4653667,57	-11625,19	-16765,33	-796,22	1	0	0	0	0
Szenario 3.3) Gondel & Repower					-3568849,55	-8863,00	-12978,85	-608,12					
a	Montage und Hub Ersatzteile (Getriebe, Generator, Schmieröl in 10 J)	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	3,31	0,02	0,01	0,00	1	1	0	1	0
a	Demontage und Hub Ersatzteile	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	3,31	0,02	0,01	0,00	1	1	0	1	0
b	Hochlegierter Stahl	1418,00	kg	metal working, average for chromium steel product manufacturing (RER)	3230,63	12,54	11,19	0,79	1	1	0	0	0
b	Gusseisen	5525,00	kg	market for cast iron (GLO)	10091,38	33,17	17,35	4,59	1	1	0	0	0
b	Kupfer	415,00	kg	metal working, average for copper product manufacturing (RER)	1088,80	47,50	15,93	2,01	1	1	0	0	0
b	Schmieröl	1087,00	kg	market for lubricating oil (RER)	1682,98	6,26	5,67	0,61	1	1	0	0	0
c	Hintransport neues Getriebe & Generator (Schiff)	10855,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	110,60	2,61	0,30	0,13	1	1	1	0	0
c	Hintransport neues Getriebe & Generator (Zug)	8510,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	393,93	2,23	0,92	0,17	1	1	1	0	0
c	Hintransport neues Getriebe & Generator (LKW)	1281,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	237,75	0,41	0,17	0,04	1	1	1	0	0
c	Hintransport neues Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	122,33	0,43	0,17	0,06	1	0	1	0	0
c	Transport Wartungsteam	432,00	km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)	157,39	0,43	0,34	0,04	1	0	1	0	0
c	Transport Stahl (hochlegiert)	306,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	56,79	0,10	0,04	0,01	1	1	1	0	0
c	Transport Gusseisen	1193,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	221,42	0,38	0,16	0,04	1	1	1	0	0
c	Transport Kupfer	144,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	26,73	0,05	0,02	0,00	1	1	1	0	0
c	Abtransport altes Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	122,33	0,43	0,17	0,06	1	0	1	0	0
d	Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	565,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)	2597,55	12,51	12,03	0,74	1	1	0	0	1
d	Recycling des Gusseisens	5031,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	1639,70	7,45	3,83	0,45	1	1	0	0	1
d	Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	317,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	539,92	27,49	5,79	1,17	1	1	0	0	1
d	Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	849,00	MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)	65,95	0,05	0,02	0,01	1	0	0	0	1
d	Zufuhr von elektrischer Energie	206,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	49,48	0,12	0,18	0,01	1	0	0	0	1
d	Verbrauch von Propangas	5,04	kg	market for propane (GLO)	5,04	0,01	0,01	0,00	1	0	0	0	1
d	Verbrennung von Kohlenwasserstoffen	13477,00	MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW (Europe without Switzerland)	1371,52	8,21	0,38	0,43	1	0	0	0	1
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-14885268,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-3575545,17	-8931,96	-12881,28	-611,76	1	0	0	0	0
e	Vermeidung von hochlegiertem Stahl	-1291,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)	-5935,28	-28,59	-27,49	-1,69	1	1	0	0	0
e	Vermeidung von Gusseisen	-5031,00	kg	cast iron production (RER)	-8007,22	-24,26	-16,10	-3,87	1	1	0	0	0
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-317,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-2147,41	-36,78	-125,13	-1,80	1	1	0	0	0

(Fortsetzung)

Kat.	Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
					GWP	AP	EP	POF	Lebensdauer	Ausfallquoten	Transport	Montagetätigkeiten	Materialverwertung
					[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Äthyl-Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%
e	Vermeidung Herstellung Schmieröl	-680,00	kg	lubricating oil production (RER)	-1033,31	-3,84	-3,53	-0,38	1	0	0	0	0
Szenario 3.4) Rotor & Repower					-3271199,86	-8072,15	-11794,74	-553,08					
a	Demontage der V90 Rotorblätter	78,48	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	7,86	0,05	0,01	0,00	0	0	0	1	0
a	Montage der V100 Rotorblätter	88,29	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	8,84	0,06	0,01	0,00	0	0	0	1	0
a	Zerschneiden der 3 Rotorblätter	6124,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	613,18	3,87	0,99	0,29	0	0	0	1	0
b	Niedrig legierter Stahl	1969,00	kg	metal working, average for steel product manufacturing (RER)	3185,63	10,04	8,33	0,86	0	0	0	0	0
b	Glasfaser (in GFK)	11834,00	kg	market for glass fibre (GLO)	29350,44	182,08	94,07	9,86	0	0	0	0	0
b	Epoxidharz (in CFK)	656,00	kg	market for epoxy resin, liquid (RER)	3335,69	10,31	15,89	0,99	0	0	0	0	0
b	Epoxidharz (in GFK)	6372,00	kg	market for epoxy resin, liquid (RER)	32400,91	100,19	152,40	9,66	0	0	0	0	0
b	Kupfer	67,50	kg	metal working, average for copper product manufacturing (RER)	17,05	0,74	0,25	0,03	0	0	0	0	0
b	Sonstige Polymere	383,00	kg	market for polyvinylidenchloride, granulate (RER)	1910,18	10,40	1,17	0,62	0	0	0	0	0
b	Karbonfaser (in CFK)	41341,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	14341,90	41,77	9,75	2,72	0	0	0	0	0
b	Karbonfaser (in CFK)	14024,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	5832,58	24,26	13,53	1,30	0	0	0	0	0
b	Karbonfaser (in CFK)	439264,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)	33041,67	20,54	7,22	2,70	0	0	0	0	0
b	Karbonfaser (in CFK)	40731,00	kWh	market for electricity, medium voltage (JP)	25589,42	99,39	52,55	5,36	0	0	0	0	0
b	Karbonfaser (in CFK)	2439,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	10293,68	36,94	183,50	2,06	0	0	0	0	0
b	Karbonfaser (in CFK)	24,40	kg	market for vinyl acetate (RoW)	106,96	0,37	5,88	0,06	0	0	0	0	0
c	Hintransport neues Rotorblatt (Zug)	1575,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	72,91	0,41	0,17	0,03	0	0	1	0	0
c	Hintransport neues Rotorblatt (Schiff)	5175,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	52,73	1,24	0,14	0,06	0	0	1	0	0
c	Hintransport neues Rotorblatt (Schubverband)	33750,00	tkm	market for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (RER)	1702,58	10,61	3,33	0,71	0	0	1	0	0
c	Hintransport neues Rotorblatt (LKW)	1647,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	166,60	0,32	0,13	0,03	0	0	1	0	0
c	Abtransport zerkleinertes Rotorblatt	1220,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	226,43	0,39	0,16	0,04	0	0	1	0	0
c	Transport Wartungsteam	432,00	km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)	157,39	0,43	0,34	0,04	0	0	1	0	0
c	Transport Stahl (niedrig legiert)	378,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	70,16	0,12	0,05	0,01	0	0	1	0	0
c	Transport Kupfer	21,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	3,90	0,01	0,00	0,00	0	0	1	0	0
c	Transport Polymere	21,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	3,90	0,01	0,00	0,00	0	0	1	0	0
c	Transport GFK	10076,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	1870,09	3,24	1,33	0,33	0	0	1	0	0
c	Transport CFK	1614,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	299,56	0,52	0,21	0,05	0	0	1	0	0
d	Stahl (niedrig legiert)	1593,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	519,19	2,36	1,21	0,14	0	0	0	0	1
d	Kupfer	46,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	78,35	3,99	0,84	0,17	0	0	0	0	1
d	Aufbereitung sonstiger Polymerabfälle	298,00	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)	296,21	0,44	0,84	0,04	0	0	0	0	1
d	Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	163,00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-120,03	-0,02	-0,02	0,00	0	0	0	0	1
d	Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	1143,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-234,25	-0,04	-0,03	0,00	0	0	0	0	1
d	Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	9147,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	2197,17	5,49	7,92	0,38	0	0	0	0	1
d	Feinzerkleinerung in Hammermühle	637,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	153,01	0,38	0,55	0,03	0	0	0	0	1
d	Zerkleinerung in Schneidmühlen	533,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	128,03	0,32	0,46	0,02	0	0	0	0	1
d	Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	12966,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	3114,52	7,78	11,22	0,53	0	0	0	0	1
d	Stickstoffverbrauch Pyrolyse	1077,00	kg	market for nitrogen, liquid (RER)	203,73	0,86	0,67	0,05	0	0	0	0	1
d	CO ₂ -Emissionen der Pyrolyse	1575,00	kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions	1575,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	1
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-13953500,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-3351728,00	-8372,85	-12074,95	-573,47	1	0	0	0	0
e	Vermeidung von Wärmeproduktion	-1143,00	MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	-62,63	-0,04	-0,02	-0,01	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-163,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-39,15	-0,10	-0,14	-0,01	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-1593,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-3426,03	-11,35	-9,98	-1,54	0	0	0	0	0

(Fortsetzung)

Kat.	Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
					GWP	AP	EP	POF	Lebens- dauer	Ausfall- quoten	Trans- port	Montage- tätig- keiten	Material- verwert- ung
					[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Äthyl- Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-45,80	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-310,26	-5,31	-18,08	-0,26	0	0	0	0	0
e	Vermeidung Kreide (durch GFK)	-6602,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (RER)	-2532,45	-10,85	-3,46	-1,51	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-4047,00	kg	market for glass fibre (GLO)	-10037,28	-62,27	-32,17	-3,37	0	0	0	0	0
e	Vermeidung der Primärproduktion von PE	-149,00	kg	polyethylene production, high density, granulate (RER)	-335,52	-0,79	-0,75	-0,13	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-34896,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	-12106,02	-35,26	-8,23	-2,30	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-11838,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	-4923,42	-20,48	-11,42	-1,10	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-370780,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)	-27890,27	-17,33	-6,09	-2,28	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-34381,00	kWh	market for electricity, medium voltage (JP)	-21600,00	-83,90	-44,35	-4,53	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-2059,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	-8689,91	-31,18	-154,91	-1,74	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-21,00	kg	market for vinyl acetate (RoW)	-92,06	-0,32	-5,06	-0,05	0	0	0	0	0
Szenario 4.4) Rotor & Repurpose					-30626,68	-86,58	-70,19	-15,46					
a	Demontage des Rotors (Kran)	149,11	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	14,93	0,09	0,02	0,01	0	0	0	1	0
a	Zerschneiden der 3 Rotorblätter	6123,60	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	613,14	3,87	0,99	0,29	0	0	0	1	0
c	Transport der zerkleinerten Rotorblätter	1220,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	226,43	0,39	0,16	0,04	0	0	1	0	0
c	Transport Gusseisen	3845,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	713,63	1,24	0,51	0,13	0	0	1	0	0
c	Transport GFK	123,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	22,83	0,04	0,02	0,00	0	0	1	0	0
d	Recycling des Gusseisens	16207,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	5282,16	24,00	12,34	1,44	0	0	0	0	1
d	Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	112,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	26,90	0,07	0,10	0,00	0	0	0	0	1
d	Feinzerkleinerung in Hammermühle	7,78	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	1,87	0,00	0,01	0,00	0	0	0	0	1
e	Vermeidung von Beton	-4,92	m³	concrete, all types to generic market for concrete, normal strength (AT)	-1326,00	-3,27	-2,16	-0,24	0	0	0	0	0
e	Vermeidung niedrig legierter Stahl	-4768,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-10254,44	-33,97	-29,87	-4,61	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Gusseisen	-16207,00	kg	cast iron production (RER)	-25794,69	-78,15	-51,87	-12,46	0	0	0	0	0
e	Vermeidung Kreide (durch GFK)	-80,60	kg	market for calcium carbonate, precipitated (RER)	-30,92	-0,13	-0,04	-0,02	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-49,40	kg	market for glass fibre (GLO)	-122,52	-0,76	-0,39	-0,04	0	0	0	0	0
Szenario 5.1) Fundament & Recycle					2573,92	97,48	-161,13	-4,70					
a	Aushub (Erdschicht)	158,00	m³	excavation, skid-steer loader (RER)	89,33	0,56	0,14	0,04	0	0	0	1	0
a	Zerkleinerung Stahlbeton (Hydraulikhammer)	483064,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	48367,71	305,33	77,75	22,94	0	0	0	1	0
c	Abtransport grob zerkleinertes Fundament	397817,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	73834,37	128,00	52,53	13,20	0	0	1	0	0
c	Weitertransport des Armierungsstahls	7197,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	1335,75	2,32	0,95	0,24	0	0	1	0	0
c	Transport Kupfer	13,90	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	2,58	0,00	0,00	0,00	0	0	1	0	0
c	Transport Polymere	7,32	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	1,36	0,00	0,00	0,00	0	0	1	0	0
d	Zerkleinerung mit Prall- und Backenbrechern	7893,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	1895,95	4,74	6,83	0,32	0	0	0	0	1
d	Recycling des Stahls zu Stahl-Barren	34854,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	11359,56	51,61	26,53	3,10	0	0	0	0	1
d	Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	30,50	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	51,95	2,64	0,56	0,11	0	0	0	0	1
d	Aufbereitung Polymerabfälle	105,00	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)	104,37	0,16	0,30	0,01	0	0	0	0	1
d	Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	57,40	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-42,70	-0,01	-0,01	0,00	0	0	0	0	1
d	Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	403,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-83,32	-0,01	-0,01	0,00	0	0	0	0	1
e	Vermeidung von Beton	-219,00	m³	concrete, all types to generic market for concrete, normal strength (AT)	-59023,02	-145,70	-96,03	-10,73	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Stahl (niedrig-legiert)	-34854,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-74959,82	-248,30	-218,36	-33,71	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-30,40	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-205,93	-3,53	-12,00	-0,17	0	0	0	0	0
e	Vermeidung der Primärproduktion von PE	-52,60	kg	polyethylene production, high density, granulate (RER)	-118,45	-0,28	-0,26	-0,05	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Wärmeproduktion	-403,00	MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	-22,08	-0,02	-0,01	0,00	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-57,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-13,69	-0,03	-0,05	0,00	0	0	0	0	0

(Fortsetzung)

				LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse					
				GWP	AP	EP	POF	Lebens- dauer	Ausfall- quoten	Trans- port	Montage- tätig- keiten	Material- verwert- ung	
Kat. Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Äthylen- Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%	
Szenario 5.2) Turm & Recycle				-252694,12	-864,35	-836,89	-123,75						
a	Demontage des Turmes (Kran)	290,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	29,04	0,18	0,05	0,01	0	0	0	1	0
a	Zerkleinerung und Trennung der Turmmaterialien mit Hydraulischen (Bagger)	7400,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	740,94	4,68	1,19	0,35	0	0	0	1	0
c	Transport Stahl	31759,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	5894,43	10,22	4,19	1,05	0	0	1	0	0
c	Transport Aluminium	160,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	29,70	0,05	0,02	0,01	0	0	1	0	0
c	Transport Kupfer	76,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	14,11	0,02	0,01	0,00	0	0	1	0	0
d	Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	133872,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	43631,36	198,22	101,90	11,89	0	0	0	0	1
d	Recycling des Aluminiums (zu Gusslegierung)	727,00	kg	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner (RER)	656,75	2,61	1,48	0,16	0	0	0	0	1
d	Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	168,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	286,14	14,57	3,07	0,62	0	0	0	0	1
e	Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-133872,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-287915,89	-953,72	-838,69	-129,48	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Aluminium (Gusslegierung)	-727,00	kg	aluminium production, primary, cast alloy slab from continuous casting (RoW)	-14922,63	-121,70	-43,80	-7,41	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-168,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-1138,06	-19,49	-66,31	-0,95	0	0	0	0	0
Szenario 5.3) Gondel & Recycle				-151681,37	-815,06	-975,81	-65,95						
a	Demontage der Gondel (Kran)	266,83	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	26,72	0,17	0,04	0,01	0	0	0	1	0
c	Transport Stahl (niedrig legiert)	668,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	123,98	0,21	0,09	0,02	0	0	1	0	0
c	Transport Stahl (hochlegiert)	5071,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	941,17	1,63	0,67	0,17	0	0	1	0	0
c	Transport Gusseisen	7518,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	1395,33	2,42	0,99	0,25	0	0	1	0	0
c	Transport Aluminium	525,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	97,44	0,17	0,07	0,02	0	0	1	0	0
c	Transport Kupfer	589,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	109,32	0,19	0,08	0,02	0	0	1	0	0
c	Transport GFK	1131,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	209,91	0,36	0,15	0,04	0	0	1	0	0
c	Transport Schmieröl	38,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	7,05	0,01	0,01	0,00	0	0	1	0	0
d	Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	2814,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	917,13	4,17	2,14	0,25	0	0	0	0	1
d	Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	9357,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)	43018,13	207,25	199,26	12,23	0	0	0	0	1
d	Recycling des Gusseisens	31690,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	10328,36	46,92	24,12	2,82	0	0	0	0	1
d	Recycling des Aluminiums (zu Gusslegierung)	2379,00	kg	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner (RER)	2149,13	8,55	4,84	0,53	0	0	0	0	1
d	Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	1291,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	2198,84	111,95	23,58	4,78	0	0	0	0	1
d	Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	1026,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	246,45	0,62	0,89	0,04	0	0	0	0	1
d	Feinzerkleinerung in Hammermühle	71,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	17,05	0,04	0,06	0,00	0	0	0	0	1
d	Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	506,00	MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)	39,31	0,03	0,01	0,00	0	0	0	0	1
d	Zufuhr von elektrischer Energie	123,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	29,55	0,07	0,11	0,01	0	0	0	0	1
d	Verbrauch von Propangas	3,00	kg	market for propane (GLO)	3,00	0,01	0,00	0,00	0	0	0	0	1
d	Verbrennung von Kohlenwasserstoffen	8038,00	MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW (Europe without Switzerland)	818,01	4,90	0,23	0,26	0	0	0	0	1
e	Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-2814,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-6052,01	-20,05	-17,63	-2,72	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von hochlegiertem Stahl	-21362,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)	-98210,24	-473,15	-454,92	-27,92	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Gusseisen	-31690,00	kg	cast iron production (RER)	-50437,08	-152,81	-101,41	-24,37	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Aluminium (Gusslegierung)	-2379,00	kg	aluminium production, primary, cast alloy slab from continuous casting (RoW)	-48832,11	-398,23	-143,31	-24,26	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-1291,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-8745,44	-149,80	-509,58	-7,32	0	0	0	0	0

(Fortsetzung)

Kat.	Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
					GWP	AP	EP	POF	Lebensdauer	Ausfallquoten	Transport	Montagetätigkeiten	Materialverwertung
					[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Äthyl-Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%
e	Vermeidung Kreide (durch GFK)	-741,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (RER)	-284,24	-1,22	-0,39	-0,17	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-454,00	kg	market for glass fibre (GLO)	-1126,00	-6,99	-3,61	-0,38	0	0	0	0	0
e	Vermeidung Herstellung Schmieröl	-441,00	kg	lubricating oil production (RER)	-670,13	-2,49	-2,29	-0,25	0	0	0	0	0
Szenario 5.4) Rotor & Recycle					-100892,03	-302,31	-307,12	-27,61					
a	Demontage des Rotors (Kran)	149,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	14,93	0,09	0,02	0,01	0	0	0	1	0
a	Zerschneiden der 3 Rotorblätter	6124,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	613,14	3,87	0,99	0,29	0	0	0	1	0
c	Transport Stahl (niedrig legiert)	378,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	70,16	0,12	0,05	0,01	0	0	1	0	0
c	Transport Gusseisen	3845,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	713,63	1,24	0,51	0,13	0	0	1	0	0
c	Transport Kupfer	21,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	3,90	0,01	0,00	0,00	0	0	1	0	0
c	Transport Polymere	21,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	3,90	0,01	0,00	0,00	0	0	1	0	0
c	Transport GFK	10076,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	1870,09	3,24	1,33	0,33	0	0	1	0	0
c	Transport CFK	1614,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	299,56	0,52	0,21	0,05	0	0	1	0	0
d	Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	1593,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	519,19	2,36	1,21	0,14	0	0	0	0	1
d	Recycling des Gusseisens	16207,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	5282,16	24,00	12,34	1,44	0	0	0	0	1
d	Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	46,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	78,35	3,99	0,84	0,17	0	0	0	0	1
d	Aufbereitung Polymerabfälle	298,00	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)	296,21	0,44	0,84	0,04	0	0	0	0	1
d	Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	163,00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-120,03	-0,02	-0,02	0,00	0	0	0	0	1
d	Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	1143,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-234,25	-0,04	-0,03	0,00	0	0	0	0	1
d	Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	9147,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	2197,17	5,49	7,92	0,38	0	0	0	0	1
d	Feinzerkleinerung in Hammermühle	637,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	153,01	0,38	0,55	0,03	0	0	0	0	1
d	Zerkleinerung in Schneidmühlen	533,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	128,03	0,32	0,46	0,02	0	0	0	0	1
d	Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	12966,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	3114,52	7,78	11,22	0,53	0	0	0	0	1
d	Stickstoffverbrauch Pyrolyse	1077,00	kg	market for nitrogen, liquid (RER)	203,73	0,86	0,67	0,05	0	0	0	0	1
d	CO ₂ -Emissionen der Pyrolyse	1575,00	kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions	1575,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	1
e	Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-1593,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-3426,03	-11,35	-9,98	-1,54	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Gusseisen	-16207,00	kg	cast iron production (RER)	-25794,69	-78,15	-51,87	-12,46	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-46,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-311,61	-5,34	-18,16	-0,26	0	0	0	0	0
e	Vermeidung der Primärproduktion von PE	-6602,00	kg	polyethylene production, high density, granulate (RER)	-2532,45	-10,85	-3,46	-1,51	0	0	0	0	0
e	Vermeidung Kreide (durch GFK)	-4047,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (RER)	-10037,28	-62,27	-32,17	-3,37	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-75,00	kg	market for glass fibre (GLO)	-168,89	-0,40	-0,38	-0,07	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-34896,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	-12106,02	-35,26	-8,23	-2,30	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-11838,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	-4923,42	-20,48	-11,42	-1,10	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-370780,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)	-27890,27	-17,33	-6,09	-2,28	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-34381,00	kWh	market for electricity, medium voltage (JP)	-21600,00	-83,90	-44,35	-4,53	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-2059,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	-8689,91	-31,18	-154,91	-1,74	0	0	0	0	0
e	Herstellung von Karbonfasern	-21,00	kg	market for vinyl acetate (RoW)	-92,06	-0,32	-5,06	-0,05	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Wärmeproduktion	-1143,00	MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	-62,63	-0,04	-0,02	-0,01	0	0	0	0	0
e	Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-163,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-39,15	-0,10	-0,14	-0,01	0	0	0	0	0
Szenario 6.4) Rotor & Recover					-34214,38	-57,30	-62,19	-11,69					
a	Demontage des Rotors (Kran)	149,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	14,93	0,09	0,02	0,01	0	0	0	1	0
a	Zerschneiden der 3 Rotorblätter	6124,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	613,14	3,87	0,99	0,29	0	0	0	1	0
c	Transport Polymere	4,08	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	0,76	0,00	0,00	0,00	0	0	1	0	0
c	Transport GFK	15760,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	2925,04	5,07	2,08	0,52	0	0	1	0	0

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	LCIA-Ergebnisse Absolut				Sensitivitätsanalyse				
				GWP	AP	EP	POF	Lebensdauer	Ausfallquoten	Transport	Montagetätigkeiten	Materialverwertung
				[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Ethylen-Äq]	+50%	+20%	+50%	+50%	+20%
c Transport CFK	645,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	119,71	0,21	0,09	0,02	0	0	1	0	0
c Transport Stahl (niedrig legiert)	378,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	70,16	0,12	0,05	0,01	0	0	1	0	0
c Transport Gusseisen	3845,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	713,63	1,24	0,51	0,13	0	0	1	0	0
c Transport Kupfer	20,88	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	3,88	0,01	0,00	0,00	0	0	1	0	0
d Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere	371,00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-273,89	-0,04	-0,03	0,00	0	0	0	0	1
d Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere	2608,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-534,53	-0,09	-0,07	-0,01	0	0	0	0	1
d Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	9147,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	2197,17	5,49	7,92	0,38	0	0	0	0	1
d Verbrennung des Epoxidharzes zur prozessinternen Wärmegewinnung	43980,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	-13633,75	-2,21	-1,71	-0,15	0	0	0	0	1
d Zerkleinerung in Schneidmühlen	533,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	128,03	0,32	0,46	0,02	0	0	0	0	1
d Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	1593,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	519,19	2,36	1,21	0,14	0	0	0	0	1
d Recycling des Gusseisens	16207,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	5282,16	24,00	12,34	1,44	0	0	0	0	1
d Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	46,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	78,35	3,99	0,84	0,17	0	0	0	0	1
e Vermeidung von Wärmeproduktion	-2608,00	MJ	market for heat, district or industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	-142,91	-0,10	-0,04	-0,01	0	0	0	0	0
e Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-371,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	-89,12	-0,22	-0,32	-0,02	0	0	0	0	0
e Vermeidung von Wärmeenergie aus Steinkohle	-43980,00	MJ	heat and power co-generation, hard coal (DE)	-2608,80	-6,26	-6,28	-0,35	0	0	0	0	0
e Vermiedene Koks-Produktion durch CFK Recovery	-1667,00	kg	coke production (RoW)	-53,10	-0,24	-0,21	-0,02	0	0	0	0	0
e Vermeidung der Produktion von Ton-Erden durch GFK Recovery	-1084,00	kg	market for clay (RoW)	-12,08	-0,07	-0,03	-0,01	0	0	0	0	0
e Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-1593,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	-3426,03	-11,35	-9,98	-1,54	0	0	0	0	0
e Vermeidung von Gusseisen	-16207,00	kg	cast iron production (RER)	-25794,69	-78,15	-51,87	-12,46	0	0	0	0	0
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-46,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	-311,61	-5,34	-18,16	-0,26	0	0	0	0	0

7.9 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Tabelle 7.19: Sensitivitätsanalyse – Auswirkung der Variation der Verlängerung der Lebensdauer um +50 % auf die LCIA-Ergebnisse

Szenario	GWP	AP	EP	POF
	[%]	[%]	[%]	[%]
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung	-50,00%	-50,00%	-50,00%	-50,00%
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung	-50,00%	-50,00%	-50,00%	-50,00%
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung	-50,00%	-50,00%	-50,00%	-50,00%
Szenario 1.4) Rotor & Lebensdauererweiterung	-50,00%	-50,00%	-50,00%	-50,00%
Szenario 2.2) Turm & Reuse	-50,06%	-50,05%	-50,01%	-50,07%
Szenario 2.3) Gondel & Reuse	-50,04%	-50,03%	-50,01%	-50,04%
Szenario 2.4) Rotor & Reuse	-50,02%	-50,02%	-50,00%	-50,03%
Szenario 3.1) Fundament & Repower	-50,00%	-50,00%	-50,00%	-50,00%
Szenario 3.2) Turm & Repower	-50,00%	-50,00%	-50,00%	-50,00%
Szenario 3.3) Gondel & Repower	-50,00%	-50,00%	-50,00%	-50,00%
Szenario 3.4) Rotor & Repower	-51,23%	-51,86%	-51,19%	-51,84%
Szenario 4.4) Rotor & Repurpose	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 5.1) Fundament & Recycle	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 5.2) Turm & Recycle	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 5.3) Gondel & Recycle	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 5.4) Rotor & Recycle	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 6.4) Rotor & Recover	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabelle 7.20: Sensitivitätsanalyse – Auswirkung der Variation der Austauschrate ausgefallener Komponenten um +20 % auf die LCIA-Ergebnisse

Szenario	GWP	AP	EP	POF
	[%]	[%]	[%]	[%]
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung	0,03%	0,14%	0,17%	0,10%
Szenario 1.4) Rotor & Lebensdauererweiterung	0,03%	0,05%	0,03%	0,05%
Szenario 2.2) Turm & Reuse	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 2.3) Gondel & Reuse	0,03%	0,14%	0,17%	0,10%
Szenario 2.4) Rotor & Reuse	0,03%	0,05%	0,03%	0,05%
Szenario 3.1) Fundament & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.2) Turm & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.3) Gondel & Repower	0,03%	0,14%	0,15%	0,11%
Szenario 3.4) Rotor & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 4.4) Rotor & Repurpose	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 5.1) Fundament & Recycle	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 5.2) Turm & Recycle	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 5.3) Gondel & Recycle	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 5.4) Rotor & Recycle	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 6.4) Rotor & Recover	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabelle 7.21: Sensitivitätsanalyse - Auswirkung der Variation der Transportdistanzen um +50 % auf die LCIA-Ergebnisse

Szenario	GWP	AP	EP	POF
	[%]	[%]	[%]	[%]
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung	0,02%	0,04%	0,01%	0,05%
Szenario 1.4) Rotor & Lebensdauererweiterung	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%
Szenario 2.2) Turm & Reuse	0,06%	0,05%	0,01%	0,07%
Szenario 2.3) Gondel & Reuse	0,06%	0,07%	0,02%	0,09%
Szenario 2.4) Rotor & Reuse	0,03%	0,03%	0,01%	0,04%
Szenario 3.1) Fundament & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.2) Turm & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.3) Gondel & Repower	0,02%	0,04%	0,01%	0,05%
Szenario 3.4) Rotor & Repower	0,07%	0,11%	0,02%	0,12%
Szenario 4.4) Rotor & Repurpose	1,57%	0,96%	0,49%	0,56%
Szenario 5.1) Fundament & Recycle	1460,31%	66,85%	16,60%	143,12%
Szenario 5.2) Turm & Recycle	1,17%	0,60%	0,25%	0,43%
Szenario 5.3) Gondel & Recycle	0,95%	0,31%	0,11%	0,39%
Szenario 5.4) Rotor & Recycle	1,47%	0,85%	0,34%	0,96%
Szenario 6.4) Rotor & Recover	5,60%	5,80%	2,19%	2,93%

Tabelle 7.22: Sensitivitätsanalyse- Auswirkung der Variation der Montageaufwände um +50 % auf die LCIA-Ergebnisse

Szenario	GWP	AP	EP	POF
	[%]	[%]	[%]	[%]
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.4) Rotor & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 2.2) Turm & Reuse	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 2.3) Gondel & Reuse	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 2.4) Rotor & Reuse	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.1) Fundament & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.2) Turm & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.3) Gondel & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.4) Rotor & Repower	0,01%	0,02%	0,00%	0,03%
Szenario 4.4) Rotor & Repurpose	1,03%	2,29%	0,72%	0,96%
Szenario 5.1) Fundament & Recycle	941,31%	156,90%	24,17%	244,70%
Szenario 5.2) Turm & Recycle	0,15%	0,28%	0,07%	0,15%
Szenario 5.3) Gondel & Recycle	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%
Szenario 5.4) Rotor & Recycle	0,31%	0,66%	0,16%	0,54%
Szenario 6.4) Rotor & Recover	0,92%	3,46%	0,81%	1,27%

Tabelle 7.23: Sensitivitätsanalyse – Auswirkung der Variation der Effizienz bei der Materialverwertung um +20% auf die LCIA-Ergebnisse

Szenario	GWP	AP	EP	POF
	[%]	[%]	[%]	[%]
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung	0,04%	0,14%	0,04%	0,10%
Szenario 1.4) Rotor & Lebensdauererweiterung	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 2.2) Turm & Reuse	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 2.3) Gondel & Reuse	0,04%	0,14%	0,04%	0,10%
Szenario 2.4) Rotor & Reuse	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.1) Fundament & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.2) Turm & Repower	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Szenario 3.3) Gondel & Repower	0,04%	0,13%	0,03%	0,09%
Szenario 3.4) Rotor & Repower	0,05%	0,05%	0,04%	0,05%
Szenario 4.4) Rotor & Repurpose	3,47%	5,56%	3,54%	1,87%
Szenario 5.1) Fundament & Recycle	103,23%	12,13%	4,24%	15,10%
Szenario 5.2) Turm & Recycle	3,53%	4,98%	2,54%	2,05%
Szenario 5.3) Gondel & Recycle	7,88%	9,44%	5,23%	6,34%
Szenario 5.4) Rotor & Recycle	2,62%	3,01%	2,34%	2,02%
Szenario 6.4) Rotor & Recover	-3,65%	11,80%	6,74%	3,41%

7.10 Simplifizierung der Lebenszyklusanalysen

Tabelle 7.24: Simplifizierung der Lebenszyklusanalysen der zirkulären EoL-Strategien der Vestas V90-2MW Windkraftanlage

Kat.	Prozess	Wert	Einheit	Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA-Ergebnisse Beträge				LCIA-Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1 %			
						GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF
						[kg CO ₂ -Eq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]	[kg Ethylen-Äq]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Szenario 1.1) Fundament & Lebensdauererweiterung																	
e	Vermeldung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-776895,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)		1886155,97	4661,79	5723,02	319,29	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Szenario 1.2) Turm & Lebensdauererweiterung																	
e	Vermeldung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-18021850,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	G41	4328974,04	10614,08	15595,58	740,67	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Szenario 1.3) Gondel & Lebensdauererweiterung																	
a	Montage und Hub Ersatzteile (Getriebe, Generator, Schmieröl in 10 J)	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	G42	3,31	0,02	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
a	Demontage und Hub Ersatzteile	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	G42	3,31	0,02	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
b	Hochlegierter Stahl	1416,00	kg	metal working, average for chromium steel product manufacturing (REF)	Gb1	3230,63	12,54	11,19	0,79	0,10%	0,15%	0,09%	0,13%	0,30%	0,39%	0,14%	0,78%
b	Gussisen	5525,00	kg	metal working, average for copper product manufacturing (REF)	Gb1	10991,38	33,17	17,35	4,59	0,30%	0,39%	0,14%	0,78%	0,03%	0,15%	0,13%	0,34%
b	Kupfer	415,00	kg	metal working, average for copper product manufacturing (REF)	Gb1	1068,60	47,50	15,93	2,01	0,03%	0,15%	0,13%	0,34%	0,05%	0,07%	0,05%	0,10%
b	Schmieröl	1087,00	kg	market for lubricating oil (REF)	Gb1	1682,98	5,25	5,67	0,01	0,05%	0,07%	0,05%	0,10%	0,00%	0,03%	0,00%	0,02%
c	Generator (Schiff)	10855,00	tkm	ship, heavy fuel oil (GLO)	Gc1	1,0,60	2,61	0,30	0,13	0,00%	0,03%	0,00%	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,03%
c	Hintransport neues Getriebe & Generator (Zug)	8510,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	Gc1	333,93	2,23	0,92	0,17	0,01%	0,03%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%
c	Hintransport neues Getriebe & Generator (LKW)	1281,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc1	237,75	0,41	0,17	0,04	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%
c	Hintransport neues Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	Gc1	122,33	0,43	0,17	0,06	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%
c	Transport Wartungsteam	432,00	km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (REF)	Gc1	137,39	0,43	0,34	0,04	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%
c	Transport Stahl (Hochlegiert)	306,00	tkm	metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc1	55,78	0,10	0,04	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Transport Gussisen	1193,00	tkm	metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc1	221,42	0,38	0,16	0,04	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%
c	Transport Kupfer	144,00	tkm	metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc1	26,73	0,05	0,02	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Alttransport altes Schmieröl	61,00	tkm	commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	Gc1	122,33	0,43	0,17	0,06	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%
d	Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	565,00	kg	steel production, electric, chromium steel 13/8 (REF)	G41	2597,55	12,51	12,03	0,74	0,08%	0,15%	0,10%	0,13%	0,05%	0,09%	0,03%	0,08%
d	Recycling des Gussisens	5031,00	kg	steel production, electric, low alloyed (AT)	G41	1639,70	7,45	3,83	0,45	0,05%	0,09%	0,03%	0,08%				

(Fortsetzung)

Ktl. Prozess	Wert	Einheit	Reinvoient-Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA Ergebnisse Beträge				LCIA Ergebnisse Relativ				Cut-Off: 1 %			
					GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF
					[kg CO2-Eq]	[kg SO2-Eq]	[kg PO4-Eq]	[kg Ethylen-Aq]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
d Recycling des Kupfers (zu Kohlenmaterial)	3.7,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (REF)	Gd1	559,92	27,49	5,79	1,17	0,02%	0,32%	0,05%	0,20%				
d Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	849,00	MJ	heat production, natural gas, at boiler	Gd1	65,95	0,05	0,02	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Zufuhr von elektrischer Energie	206,00	kWh	electricity production, average (EUROPE WITHOUT SWITZERLAND)	Gd1	49,48	0,12	0,18	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Verbrauch von Propangas	5,04	kg	market for propane (GLO)	Gd1	5,04	0,01	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Verbrennung von Kohlenwasserstoffen	13477,00	MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace (EUROPE WITHOUT SWITZERLAND)	Gd1	1371,52	8,21	0,38	0,23	0,04%	0,10%	0,00%	0,07%				
e Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-1384670,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	Ge2	332073,90	8306,76	11982,53	569,08	98,78%	97,01%	57,98%	56,75%	98,78%	97,01%	57,98%	56,75%
e Vermeidung von Hochlegiertem Stahl	-1291,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (REF)	Ge3	5935,26	28,59	27,49	1,69	0,18%	0,33%	0,22%	0,29%				
e Vermeidung von Gusseisen	-5031,00	kg	cast iron production (REF)	Ge3	8007,22	24,26	15,10	3,67	0,24%	0,28%	0,13%	0,66%	0,24%	0,28%	0,13%	0,66%
e Vermeidung von Kupfer (Kohlenmaterial)	-317,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrorefining process (GLO)	Ge3	2147,41	36,78	125,13	1,80	0,06%	0,43%	1,02%	0,31%				
e Vermeidung Herstellung Schmieröl	-630,00	kg	lubricating oil production (REF)	Ge3	1030,31	3,64	3,53	0,38	0,03%	0,04%	0,03%	0,06%				
Szenario: 4) Motor & Lebensdauererweiterung																
a Montage und Hub-Ersatzteile (Roboter)	5,76	MJ	diesel burned in building machine (GLO)	Gd4	0,58	0,00	0,00	0,00	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	98,43%	95,26%	59,48%	99,27%
a Demontage und Hub-Ersatzteile	5,76	MJ	diesel burned in building machine (GLO)	Gd4	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
a Zerschneiden des Rotorklattes	449,00	MJ	diesel burned in building machine (GLO)	Gd4	44,96	0,28	0,07	0,02	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
b Niedriglegierter Stahl	128,00	kg	metal working, average for steel product manufacturing (REF)	Gb2	207,09	0,65	0,54	0,06	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%				
b Glasfaser (in GFK)	771,00	kg	market for glass fibre (GLO)	Gb2	1912,22	11,38	6,13	0,64	0,06%	0,15%	0,05%	0,12%				
b Epoxidharz (in C-FK)	42,80	kg	market for epoxy resin, liquid (REF)	Gb2	217,63	0,67	1,02	0,06	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%				
b Epoxidharz (in GFK)	415,00	kg	market for epoxy resin, liquid (REF)	Gb2	2110,23	6,53	9,93	0,63	0,07%	0,08%	0,09%	0,11%				
b Kautschuk	4,40	kg	metal working, average for copper product manufacturing (REF)	Gb2	11,54	0,50	0,17	0,02	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%				
b Sonstige Polymere	24,90	kg	market for polyvinylchloride, granulate (REF)	Gb2	154,19	0,68	0,08	0,04	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%				
b Karbonfaser (in C-FK)	2695,00	kg	market for steam, in chemical industry (ROW)	Gb2	954,94	2,72	0,64	0,18	0,03%	0,03%	0,01%	0,03%				
b Karbonfaser (in C-FK)	974,00	kg	market for nitrogen, liquid (ROW)	Gb2	360,13	1,58	0,88	0,09	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%				
b Karbonfaser (in C-FK)	28933,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (ROW)	Gb2	2133,76	1,34	0,47	0,18	0,07%	0,02%	0,00%	0,03%				
b Karbonfaser (in C-FK)	2655,00	kWh	market for electricity, medium voltage (JP)	Gb2	1698,01	6,49	3,43	0,35	0,05%	0,08%	0,03%	0,06%				
b Kaliumfaser (in C-FK)	159,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	Gb2	671,05	2,41	11,36	0,19	0,02%	0,03%	0,10%	0,02%				
b Karbonfaser (in C-FK)	1,59	kg	market for vinyl acetate (ROW)	Gb2	6,97	0,02	0,38	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Hint transport neues Rotorklatt (Zug)	103,00	tkm	market for transport, freight, t air, 'fleet average (EUROPE WITHOUT SWITZERLAND)	Gc2	4,77	0,03	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Hint transport neues Rotorklatt (Schiff)	337,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	Gc2	3,43	0,08	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				

(Fortsetzung)

LCIA-Ergebnisse Beiträge					LCIA-Ergebnisse Relativ					Cut-Off 1 %										
Kat. Prozess	Wert	Einheit	ecoinvent-Prozess	Gemein-samkeit	GWP	AP	EP	POF	[kg CO2-eq]	[kg SO2-Äq]	[kg PO4-Äq]	[kg Ethylen-Äq]	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF
c Hinttransport neues Rotorblatt (Schubverband)	2200,00	tkm	market for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (RER)	Gc2	110,98	0,69	0,22	0,05					0,00%	0,01%	0,00%	0,01%				
c Hinttransport neues Rotorblatt (LKW)	107,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	Gc2	10,62	0,02	0,01	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Abtransport zerfallenes Rotorblatt	89,50	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	Gc2	16,61	0,03	0,01	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport Wartungssteam	432,00	km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)	Gc3	157,39	0,43	0,34	0,04					0,00%	0,01%	0,00%	0,01%				
c Transport Stahl (niedrig legiert)	27,70	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	Gc2	5,14	0,01	0,00	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport Kupfer	1,53	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	Gc2	0,20	0,00	0,00	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport Polymare	1,52	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	Gc2	0,28	0,00	0,00	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport GFK	730,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	Gc2	135,49	0,23	0,10	0,02					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport CFK	116,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	Gc2	21,90	0,04	0,02	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Stahl (niedrig legiert)	117,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	Gd2	30,13	0,17	0,09	0,01					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Kupfer	3,36	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	Gd2	5,72	0,29	0,06	0,01					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Aufbereitung sonstiger Polymerabfälle	21,90	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)	Gd2	21,77	0,03	0,06	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Elektrizitätsprodukt aus Verbrennung Polymare (50%)	12,00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	Gd2	5,86	0,00	0,00	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Wärmeprodukt aus Verbrennung Polymare (50%)	84,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	Gd2	17,20	0,00	0,00	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	553,00	kWh	market for electric city, high voltage (AT)	Gd2	159,26	0,40	0,57	0,03					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Feinzerkleinerung in Hammermühle	46,20	kWh	market for electric city, high voltage (AT)	Gd2	11,10	0,03	0,04	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Zerkleinerung in Schneidmühlen	39,10	kWh	market for electric city, high voltage (AT)	Gd2	9,39	0,02	0,03	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	951,00	kWh	market for electric city, high voltage (AT)	Gd2	228,44	0,57	0,82	0,04					0,01%	0,01%	0,01%	0,01%				
d Stickstoffverbrauch Pyrolyse	79,00	kg	market for nitrogen, liquid (RER)	Gd2	14,94	0,06	0,05	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d CO2-Emissionen der Pyrolyse	116,00	kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions	Gd2	116,00	0,00	0,00	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
e Vermeidung Energieprodukt aus für weitere LCJahre	-1321250,00	kWh	market for electric city, high voltage (AT)	Gc4	3173754,63	7928,21	11433,71	543,01					99,45%	99,26%	99,48%	99,27%	99,43%	99,26%	99,48%	99,27%
c Vermeidung von Wärmeproduktion	-83,80	MJ	market for heat, district industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	Gc4	4,59	0,00	0,00	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
e Vermeidung von Elektrizitätsprodukt aus Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-11,90	kWh	market for electric city, high voltage (AT)	Gc4	2,86	0,01	0,01	0,00					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
e Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-106,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	Gc4	227,97	0,76	0,66	0,10					0,01%	0,01%	0,01%	0,02%				

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA Ergebnisse Beiträge				LCIA Ergebnisse Relativ				Cut-Off1%			
					GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF
					[kg CO ₂ -Eq]	[kg SO ₂ -Eq]	[kg PO ₄ -Eq]	[kg Ethylen-Ac]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-2,56	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electro-winning process (GLO)	Ge4	17,34	0,20	1,01	0,01	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%				
e Vermeidung von Kreide (durch GFK)	-478,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (RE)	Ge4	183,36	0,79	0,25	0,11	0,01%	0,01%	0,00%	0,02%				
e Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-283,00	kg	market for glass fibre (GLO)	Ge4	776,68	4,51	2,33	0,24	0,02%	0,06%	0,02%	0,04%				
e Vermeidung der Primärproduktion von PE	-5,46	kg	polyethylene production, high density, granulate (RE)	Ge1	12,30	0,03	0,03	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
e Herstellung von Kohlenfasern	-2560,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	Ge4	368,11	2,50	0,60	0,17	0,03%	0,03%	0,01%	0,03%				
e Herstellung von Kohlenfasern	-888,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	Ge4	361,00	1,50	0,84	0,08	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%				
e Herstellung von Kohlenfasern	-27202,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial turbine >100kW (RoW)	Ge4	2046,15	1,27	0,45	0,17	0,06%	0,02%	0,00%	0,03%				
e Herstellung von Kohlenfasern	-2522,00	kWh	market for electricity, medium voltage (P)	Ge4	1584,46	6,15	3,25	0,33	0,05%	0,08%	0,03%	0,06%				
e Herstellung von Kohlenfasern	-151,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	Ge1	657,26	2,29	11,36	0,13	0,02%	0,03%	0,10%	0,02%				
e Herstellung von Kohlenfasern	-2,30	kg	market for vinyl acetate (RoW)	Ge4	8,77	0,03	0,48	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
Szenario 2.2) Turn & Reuse																
a Montage des Turms	250,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge1	4334421,65	10824,89	15599,86	741,74	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,97%	99,90%	99,97%	99,86%
a Demontage des Turms	250,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge1	29,04	0,18	0,05	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport des Turms	53280,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RE)	Ge1	5389,54	10,45	4,18	1,04	0,12%	0,10%	0,03%	0,14%				
e Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-18021850,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	Ge1	4828974,04	10814,08	15595,58	740,67	99,87%	99,90%	99,97%	99,85%	99,97%	99,90%	99,97%	99,86%
Szenario 2.3) Gondel & Reuse																
a Montage der Gondel	256,80	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge3	3369545,65	8569,82	12231,46	588,69	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,01%	97,34%	98,11%	97,45%
a Demontage der Gondel	256,80	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge3	26,71	0,17	0,04	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
a Montage und Hub Ersatzteile (Getriebe, Generator, Schmieröl in 10.)	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge2	3,31	0,02	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
a Demontage und Hub Ersatzteile	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge2	3,31	0,02	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
b Hochlegierter Stahl	1418,00	kg	metal working, average for chromium steel product: manufacturing (RE)	Ge1	5230,63	12,54	11,19	0,79	0,10%	0,15%	0,09%	0,13%				
b Gussteile	5525,00	kg	market for cast iron (GLO)	Ge1	10661,38	33,17	17,35	4,59	0,30%	0,39%	0,14%	0,78%	0,30%	0,39%	0,14%	0,78%
b Kupfer	415,00	kg	metal working, average for copper product manufacturing (RE)	Ge1	1088,80	47,50	15,93	2,01	0,03%	0,55%	0,13%	0,44%				
b Schmieröl	1097,00	kg	market for lubricating oil (RE)	Ge1	1682,98	6,26	5,67	0,61	0,05%	0,07%	0,05%	0,10%				
c Transport der Gondel	24480,00	tkm	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6 (RE)	Ge1	2476,28	4,80	1,92	0,48	0,07%	0,08%	0,02%	0,08%				
c Hinttransport neues Getriebe & Generator (SchiFF)	10655,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	Ge1	110,60	2,61	0,30	0,13	0,00%	0,03%	0,00%	0,02%				

(Fortsetzung)

LCIA-Ergebnisse Beiträge					LCIA-Ergebnisse Relativ					Cut-Off 1 %						
Kat. Prozess	Wert	Einheit	Prozess	Gemeinsamkeit	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF
					[kg CO2-Eq]	[kg SO2-Eq]	[kg PO4-Eq]	[kg Ethylen-Aq]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
c Hintransport neues Getriebe & Generator (Zug)	8510,00	lkm	marktforttransport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	Gc1	393,93	2,23	0,62	0,17	0,01%	0,03%	0,01%	0,03%				
c Hintransport neues Getriebe & Generator (LKW)	1281,00	lkm	marktforttransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc1	237,76	0,41	0,17	0,04	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%				
c Hintransport neues Schmieröl	61,00	lkm	marktforttransport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	Gc1	122,33	0,43	0,17	0,06	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%				
c Transport: Wartungsstern	432,00	km	marktforttransport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (REF)	Gc1	137,39	0,43	0,34	0,04	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%				
c Transport: Stahl (hochlegiert)	306,00	lkm	marktforttransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc1	56,79	0,10	0,04	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport: Gusseisen	1193,00	lkm	marktforttransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc1	221,42	0,38	0,16	0,04	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%				
c Transport: Kupfer	144,00	lkm	marktforttransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc1	26,73	0,05	0,02	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Abtransport altes Schmieröl	61,00	lkm	marktforttransport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	Gc1	122,33	0,43	0,17	0,06	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%				
d Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	585,00	kg	steel production, electric, chromium steel 16/8 (REF)	Gd1	2597,55	12,51	12,33	0,74	0,08%	0,15%	0,10%	0,13%				
d Recycling des Gusseisens	5031,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	Gd1	1639,70	7,45	3,63	0,45	0,05%	0,09%	0,03%	0,08%				
d Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	317,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (REF)	Gd1	539,92	27,49	5,79	1,17	0,02%	0,32%	0,05%	0,20%				
d Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	345,00	MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-rotating <100kW (Europe without Switzerland)	Gd1	65,95	0,05	0,02	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Zufuhr von elektrischer Energie	206,00	kWh	marktfortelectricity, high voltage (AT)	Gd1	49,48	0,12	0,18	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Verbrauch von Propangas	5,04	kg	marktfortpropane (GLO)	Gd1	5,04	0,01	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Verdämmung von Kohlenwasserstoffen	13477,00	MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace, INW (Europe without Switzerland)	Gd1	1371,52	8,21	0,38	0,43	0,04%	0,10%	0,00%	0,07%				
e Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-1384670,00	kWh	marktfortelectricity, high voltage (AT)	Ge2	3325073,90	8308,76	11982,53	569,08	98,71%	96,95%	57,56%	96,67%	98,71%	96,95%	57,56%	96,57%
e Vermeidung von hochlegiertem Stahl	-1291,00	kg	steel production, electric, chromium steel 16/8 (REF)	Ge3	5835,28	28,56	27,49	1,66	0,18%	0,33%	0,22%	0,29%				
e Vermeidung von Gusseisen	-5031,00	kg	cast iron production (REF)	Ge3	8607,22	24,36	15,10	3,87	0,24%	0,23%	0,13%	0,56%				
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-317,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	Ge3	2147,41	36,78	125,13	1,80	0,05%	0,43%	1,02%	0,31%				
e Vermeidung Herstellung Schmieröl	-690,00	kg	lubricating oil production (REF)	Ge3	1033,31	3,84	3,63	0,36	0,03%	0,04%	0,03%	0,06%				
Szenario 2.4) Rotor & Rotor					3105391,10	7990,18	11404,26	547,28	103,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,38%	93,22%	59,47%	99,22%
a Montage des Rotors	146,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge5	14,93	0,09	0,02	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
a Demontage des Rotors	146,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge5	14,93	0,09	0,02	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
a Montage und Hub-Ersatzteile (Rotorblätter)	5,76	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Ge4	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	Einheit-Prozess	Gemein-samkeit	LCIA-Ergebnisse Beiträge				LCIA-Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1 %				
					GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	
																	[kg CO2-Eq]
a	Demontage und Hub Ersatzteile	5,76	MJ	diesel, burned in buliding machines (GLO)	G44	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
a	Zerschneider des Rotorblattes	445,00	MJ	diesel, burned in buliding machines (GLO)	G44	44,96	0,28	0,07	0,02	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
b	Niedrig, leichter Blatt	128,00	kg	metal working, average for steel product manufacturing (RE)	G12	227,09	0,65	0,54	0,06	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%
b	Glasfaser (in 3FK)	771,00	kg	markt for glass fibre (GLO)	G12	1912,22	11,86	6,13	0,64	0,06%	0,15%	0,05%	0,05%	0,01%	0,05%	0,12%	0,01%
b	Epoxidharz (in CFK)	42,80	kg	markt for epoxy resin, liquid (RE)	G12	217,83	0,67	1,02	0,06	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
b	Epoxidharz (in GF-K)	415,00	kg	markt for epoxy resin, liquid (RE)	G12	2110,73	6,53	9,83	0,63	0,07%	0,09%	0,09%	0,09%	0,07%	0,09%	0,11%	0,01%
b	Kupfer	4,40	kg	metal working, average for copper product manufacturing (RE)	G12	11,54	0,50	0,17	0,02	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
b	Sonstige Polymere	24,50	kg	markt for polyvinylchloride, granulate (RE)	G12	124,19	0,03	0,00	0,04	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%
b	Karborfaser (in CFK)	2695,00	kg	markt for steam, in chemical industry (ROW)	G12	934,94	2,72	0,64	0,18	0,03%	0,03%	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,03%	0,03%
b	Karborfaser (in CFK)	914,00	kg	markt for nitrogen, liquid (RoW)	G12	380,13	1,58	0,88	0,09	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,02%
b	Karborfaser (in CFK)	298533,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW (RoW)	G12	2153,79	1,34	0,47	0,18	0,07%	0,02%	0,00%	0,00%	0,03%	0,00%	0,03%	0,03%
b	Karborfaser (in CFK)	2655,00	kWh	markt for electric city, medium voltage (JP)	G12	1688,01	6,48	3,43	0,36	0,05%	0,08%	0,08%	0,08%	0,05%	0,08%	0,06%	0,06%
b	Karborfaser (in CFK)	126,00	kg	markt for acrylonitrile (GLO)	G12	671,05	2,41	11,96	0,15	0,02%	0,03%	0,10%	0,10%	0,02%	0,03%	0,02%	0,02%
b	Karborfaser (in CFK)	1,59	kg	markt for vinyl acetate (RoW)	G12	6,97	0,02	0,38	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Transport des Rotors	13880,00	tkm	markt for transport, freight, lorry, >32 metric-ton, diesel, EURO 6 (RE)	G12	1383,80	2,68	1,07	0,27	0,04%	0,03%	0,01%	0,01%	0,05%	0,01%	0,05%	0,05%
c	Hinttransport neues Rotorblatt (Zug)	103,00	tkm	markt for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	G12	4,77	0,03	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Hinttransport neues Rotorblatt (Schiff)	337,00	tkm	markt for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	G12	3,43	0,08	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Hinttransport neues Rotorblatt (Schulterverband)	2200,00	tkm	markt for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (RE)	G12	110,98	0,69	0,22	0,05	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%
c	Hinttransport neues Rotorblatt (ILKW)	107,00	tkm	markt for transport, freight, lorry, >32 metric-ton, diesel, EURO 6 (RE)	G12	10,82	0,02	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Abtransport zerklüftetes Rotorblatt	89,50	tkm	markt for transport, freight, lorry, 16-32 metric-ton, diesel, EURO 6 (RE)	G12	16,61	0,03	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Transport-Wartungsteam	432,00	km	markt for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RE)	G13	157,39	0,43	0,34	0,04	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%
c	Transport Stahl (niedrig legiert)	27,70	tkm	markt for transport, freight, lorry, 16-32 metric-ton, diesel, EURO 6 (RE)	G12	5,14	0,01	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Transport Kupfer	1,53	tkm	markt for transport, freight, lorry, 16-32 metric-ton, diesel, EURO 6 (RE)	G12	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Transport Polymere	1,52	tkm	markt for transport, freight, lorry, 16-32 metric-ton, diesel, EURO 6 (RE)	G12	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Transport GF-K	730,00	tkm	markt for transport, freight, lorry, 16-32 metric-ton, diesel, EURO 6 (RE)	G12	135,49	0,23	0,10	0,02	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c	Transport CFK	118,00	tkm	markt for transport, freight, lorry, 16-32 metric-ton, diesel, EURO 6 (RE)	G12	21,90	0,04	0,02	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
d	Stahl (niedrig legiert)	117,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AI)	G12	38,13	0,17	0,09	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
d	Kupfer	3,36	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RE)	G12	5,77	0,29	0,16	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

(Fortsetzung)

LCIA Ergebnisse Beiträge						LCIA Ergebnisse Relativ						Cut Off 1 %						
Kat.	Prozess	Wert	Einheit	Umwelt-Prozess	Gemeinsamkeit	GWP [kg CO2-Eq]	AP [kg SO2-Eq]	EP [kg PO4-Eq]	POF [kg Ethylen-Eq]	GWP [%]	AP [%]	EP [%]	POF [%]	GWP [%]	AP [%]	EP [%]	POF [%]	
d	Aufbereitung sonstiger Polymerabfälle	21.90	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (REF)	Gd2	21.77	0.03	0.06	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d	Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymers (50%)	12.00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	Gd2	8.86	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d	Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymers (50%)	84.00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	Gd2	17.29	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d	Vorzerkleinerung n Schmelzen	683.00	kWh	market forelectricity, high voltage (AT)	Gd2	156.26	0.40	0.57	0.03	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d	Felzerkleinerung in Hammermühle	46.20	kWh	market forelectricity, high voltage (AT)	Gd2	11.10	0.03	0.04	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d	Zerkleinerung in Schneidmühlen	39.10	kWh	market forelectricity, high voltage (AT)	Gd2	9.39	0.02	0.03	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d	Elektrifizierter Energieverbrauch Pyrolyse	951.00	kWh	market forelectricity, high voltage (AT)	Gd2	228.44	0.57	0.82	0.04	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	
d	Stickstoffverbrauch Pyrolyse	79.00	kg	market fornitrogen, liquic (REF)	Gd2	14.94	0.06	0.06	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
d	CO2-Emissionen der Pyrolyse	116.00	kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions	Gd2	116.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
e	Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-1321250.00	kWh	market forelectricity, high voltage (AT)	Ge4	3173794.63	7928.21	11439.71	543.01	99.36%	99.22%	99.47%	99.22%	99.36%	99.22%	99.47%	99.22%	
e	Vermeidung von Wärmeproduktion	-83.80	MJ	market for heat, districtor industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	Ge4	4.59	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
e	Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-11.90	kWh	market forelectricity, high voltage (AT)	Ge4	2.86	0.01	0.01	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
e	Vermeidung von niedrig legierten Stahl	-106.00	kg	steel production, converter, low-alloyed (REF)	Ge4	227.97	0.76	0.66	0.10	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodmaterial)	-2.56	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (C.O.)	Ge4	17.34	0.30	1.01	0.01	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	
e	Vermeidung Kreide (durch GFK)	-478.00	kg	market forcalcium carbonate, precipitated (REF)	Ge4	163.36	0.79	0.25	0.11	0.01%	0.01%	0.00%	0.02%	0.01%	0.01%	0.00%	0.02%	
e	Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-293.00	kg	market for glass fibre (GLO)	Ge4	726.66	4.51	2.33	0.24	0.02%	0.06%	0.02%	0.04%	0.02%	0.06%	0.02%	0.04%	
e	Vermeidung der Primerproduktion von PE	-5.46	kg	polyethylene production, high density, granulate (REF)	Ge4	12.30	0.03	0.03	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
e	Herstellung von Karbonfasern	-2660.00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	Ge4	388.11	2.69	0.60	0.17	0.03%	0.03%	0.01%	0.03%	0.03%	0.03%	0.01%	0.03%	
e	Herstellung von Karbonfasern	-660.00	kg	market fornitrogen, liquic (RoW)	Ge4	361.00	1.50	0.84	0.00	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	
e	Herstellung von Karbonfasern	-27202.00	MJ	heat production, industrial gas, at industrial furnace > 100kW / RoW)	Ge4	2046.15	1.27	0.45	0.17	0.06%	0.02%	0.00%	0.03%	0.06%	0.02%	0.00%	0.03%	
e	Herstellung von Karbonfasern	-25222.00	kWh	market forelectricity, medium voltage (JP)	Ge4	1584.46	6.15	3.25	0.33	0.05%	0.08%	0.03%	0.06%	0.05%	0.08%	0.03%	0.06%	
e	Herstellung von Karbonfasern	-151.00	kg	market foracrylonitrile (GLO)	Ge4	637.26	2.29	11.36	0.13	0.02%	0.03%	0.10%	0.02%	0.02%	0.03%	0.10%	0.02%	
e	Herstellung von Karbonfasern	-2.00	kg	market forvinyl, ac-state (RoW)	Ge4	8.77	0.03	0.48	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Szenario 3.1 Fundament & Repower						206126.49	5011.44	7227.28	343.24	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	
Vermeidung Energieproduktion						206126.49	5011.44	7227.28	343.24	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	einkoivent-Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA-Ergebnisse Beträge					LCIA-Ergebnisse Relativ					Cut-Off1%				
					GWP	AP	EP	POF	[kg Ethylen-Ac]	GWP	AP	EP	POF		GWP	AP	EP	POF	
					[kg CO ₂ -Eq]	[kg SO ₂ -Ac]	[kg PO ₄ -Ac]			[%]	[%]	[%]	[%]		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Szenario 3.2) Turn & Repower																			
Verminderte Energieproduktion für weitere 10 Jahre																			
e	-19375574,00	kWh	market for electricity, high voltage (A1)		4653667,57	11625,19	16765,33	796,22		100,00%	100,00%	100,07%	100,00%		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	
					4653667,57	11625,19	16765,33	796,22		100,00%	100,00%	100,03%	100,00%		100,00%	100,00%	100,03%	100,00%	
Szenario 3.3) Grid & Repower																			
Montage und Hub Ersatzteile																			
a	(Getriebe, Generator, Schmieröl, In 10.)	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	3,31	0,02	0,01	0,00		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
a	Demontage und Hub Ersatzteile	33,10	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	3,31	0,02	0,01	0,00		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
b	Hochlegierter Stahl	1418,00	kg	metal working, average for chromium steel product manufacturing (PER)	3230,63	12,54	11,19	0,79		0,09%	0,14%	0,09%	0,13%		0,28%	0,36%	0,13%	0,73%	
b	Gusselisen	5525,00	kg	market for cast iron (GLO)	10091,38	33,17	17,35	4,59		0,03%	0,52%	0,12%	0,32%		0,03%	0,52%	0,12%	0,32%	
b	Kupfer	415,00	kg	metal working, average for copper product manufacturing (PER)	1088,80	47,50	15,93	2,01		0,05%	0,07%	0,04%	0,10%		0,05%	0,07%	0,04%	0,10%	
b	Schmieröl	1037,00	kg	market for lubricating oil (PER)	1682,98	6,28	5,67	0,61		0,00%	0,03%	0,00%	0,02%		0,00%	0,03%	0,00%	0,02%	
c	Hinttransport neues Getriebe & Generator (Schiff)	10555,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)	110,86	2,61	0,30	0,13		0,01%	0,02%	0,01%	0,03%		0,01%	0,02%	0,01%	0,03%	
c	Hinttransport neues Getriebe & Generator (Zug)	8510,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)	353,93	2,23	0,92	0,17		0,01%	0,01%	0,00%	0,01%		0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	
c	Hinttransport neues Getriebe & Generator (LKW)	1231,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (PER)	257,75	0,41	0,17	0,04		0,00%	0,00%	0,00%	0,01%		0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	
c	Hinttransport neues Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	122,33	0,43	0,17	0,06		0,00%	0,00%	0,00%	0,01%		0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	
c	Transport: Wartungsteam	432,00	km	market for transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (PER)	157,36	0,43	0,34	0,04		0,00%	0,00%	0,00%	0,01%		0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	
c	Transport: Stahl (hochlegiert)	306,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (PER)	55,79	0,10	0,04	0,01		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
c	Transport: Gusseisen	1138,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (PER)	221,42	0,38	0,16	0,04		0,01%	0,00%	0,00%	0,01%		0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	
c	Transport: Kupfer	174,00	tkm	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (PER)	25,73	0,05	0,02	0,00		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
c	Aktivtransport altes Schmieröl	61,00	tkm	market for transport, freight, light commercial vehicle, fleet average (Europe without Switzerland)	122,33	0,43	0,17	0,06		0,00%	0,00%	0,00%	0,01%		0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	
d	Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	555,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (PER)	2597,55	12,51	12,03	0,74		0,07%	0,14%	0,09%	0,12%		0,07%	0,14%	0,09%	0,12%	
d	Recycling des Gusseisens	5031,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	1639,70	7,45	3,83	0,45		0,05%	0,08%	0,03%	0,07%		0,05%	0,08%	0,03%	0,07%	
d	Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	317,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (PER)	559,92	27,49	5,79	1,17		0,01%	0,30%	0,04%	0,19%		0,01%	0,30%	0,04%	0,19%	
d	Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	849,00	MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <130kW (Europe without Switzerland)	65,95	0,05	0,02	0,01		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA Ergebnisse Beiträge				LCIA Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1%			
					GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF
					[kg CO ₂ -Eq]	[kg SO ₂ -Eq]	[kg PO ₄ -Eq]	[kg Ethylen-Äq]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
d Zufuhr von elektrischer Energie	206,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)	Gd1	-49,48	0,12	0,48	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	98,87%	97,71%	58,12%	96,97%
d Verbrauch von Propangas	5,04	kg	market for propane (GLO)	Gd1	5,04	0,01	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Verfeinerung von Kohlenwasserstoffen	13477,00	MJ	heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace, INW (Europe without Switzerland)	Gd1	1371,52	8,21	0,38	0,43	0,04%	0,03%	0,00%	0,07%				
e Vermeidung Energieerzeugung für weitere 10 Jahre	-14885258,00	kWh	market for electricity, high voltage (AT)		3575545,17	8931,96	17981,28	611,76	98,87%	97,71%	58,12%	96,97%	98,87%	97,21%	58,12%	96,97%
c Vermeidung von hochlegiertem Stahl	-1201,00	kg	steel production, electric, chromium steel 16/6 (REF)	Gd3	5635,29	28,50	27,49	1,60	0,16%	0,31%	0,21%	0,27%				
e Vermeidung von Gusseisen	-5031,00	kg	cast-iron production (REF)	Gd3	8007,22	24,26	15,10	3,87	0,22%	0,28%	0,12%	0,61%	0,22%	0,28%	0,12%	0,61%
e Vermeidung von Kupfer (Kathodematerial)	-317,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	Gd3	2147,41	36,78	125,13	1,80	0,06%	0,40%	0,95%	0,29%				
e Vermeidung Herstellung Schmieröl	-690,00	kg	lubricating oil production (REF)	Gd3	1033,31	3,84	3,63	0,36	0,03%	0,04%	0,03%	0,06%				
Szenario 3.4) Rotor & Repower					3617054,73	9932,04	12944,29	651,52	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,06%	99,65%	99,14%	98,39%
a Demontage der VSO Rotorblätter	78,48	MJ	diesel, burned in bulking machine (GLO)		7,85	0,05	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
a Montage der V100 Rotorblätter	88,29	MJ	diesel, burned in bulking machine (GLO)		8,84	0,06	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
a Zerschneiden der 3 Rotorblätter	6124,00	MJ	diesel, burned in bulking machine (GLO)	Gd6	613,18	3,87	0,99	0,29	0,02%	0,04%	0,01%	0,05%				
b Niedrig legierter Stahl	1999,00	kg	metal working, average for steel product manufacturing (REF)		3185,63	10,44	8,33	0,86	0,09%	0,11%	0,06%	0,14%				
b Glasfaser (in CFK)	11854,00	kg	market for glass fibre (GLO)		29350,44	182,08	94,07	9,86	0,81%	1,57%	0,73%	1,56%	0,81%	1,67%	0,73%	1,56%
b Epoxidharz (in CFK)	556,00	kg	market for epoxy resin, liquid (REF)		3335,60	10,31	15,59	0,96	0,09%	0,11%	0,12%	0,16%				
b Epoxidharz (in GFK)	6372,00	kg	market for epoxy resin, liquid (REF)		32400,91	100,19	152,40	9,66	0,90%	1,09%	1,18%	1,53%	0,90%	1,09%	1,18%	1,53%
b Kupfer	67,50	kg	metal working, average for copper product manufacturing (REF)		17,05	0,74	0,25	0,03	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%				
b Sonstige Polymere	383,00	kg	market for polyvinylchloride, granulate (REF)		1910,13	10,40	1,17	0,62	0,05%	0,11%	0,01%	0,10%				
b Karbonfaser (in CFK)	41341,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)		14341,90	41,77	9,75	2,72	0,40%	0,45%	0,08%	0,43%	0,40%	0,45%	0,08%	0,43%
b Karbonfaser (in CFK)	14024,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)		5892,59	24,26	13,53	1,30	0,16%	0,28%	0,10%	0,21%	0,16%	0,26%	0,10%	0,21%
b Karbonfaser (in CFK)	439264,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace > 100kW (RoW)		33041,67	20,54	7,22	2,70	0,91%	0,22%	0,06%	0,43%	0,91%	0,22%	0,06%	0,43%
b Karbonfaser (in CFK)	40731,00	kWh	market for electricity, medium voltage (EP)		25588,42	99,38	32,55	5,36	0,71%	1,08%	0,41%	0,65%	0,71%	1,08%	0,41%	0,65%
b Karbonfaser (in CFK)	2439,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)		10293,68	36,94	163,50	2,06	0,26%	0,40%	1,47%	0,33%	0,26%	0,40%	1,47%	0,33%
b Karbonfaser (in CFK)	24,40	kg	market for vinyl acetate (RoW)		106,96	0,37	5,88	0,06	0,00%	0,00%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,05%	0,01%
c Hinttransport neues Rotorblatt (Zug)	1575,00	tkm	market for transport, freight, train, fleet average (Europe without Switzerland)		72,91	0,41	0,17	0,03	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%
c Hinttransport neues Rotorblatt (Schiff)	5175,00	tkm	market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil (GLO)		52,73	1,24	0,14	0,06	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%
c Hinttransport neues Rotorblatt (Schutverband)	33750,00	tkm	market for transport, freight, inland waterways, barge, diesel (REF)		1702,58	10,61	3,33	0,71	0,05%	0,11%	0,03%	0,11%	0,05%	0,11%	0,03%	0,11%

(Fortsetzung)

LCIA-Ergebnisse Beiträge					LCIA-Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1 %							
Kat. Prozess	Wert	Einheit	Environment-Process	Gemein-samkeit	GWP [kg CO2-Eq]	AP [kg SO2-Äq]	EP [kg PO4-Äq]	POF [kg Ethylen-Äq]	GWP [%]	AP [%]	EP [%]	POF [%]	GWP [%]	AP [%]	EP [%]	POF [%]
c Hintransport neues Rotoblatt (LKW)	1647,00	tkm	marketfortransport, freight, lorry, >32 metricton, diesel, EURO 6 (RER)		156,60	0,32	0,13	0,03	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%				
c Abtransport zerklüftetes Rotoblatt	1220,00	tkm	marketfortransport, freight, lorry, 16-32 metricton, diesel, EURO 6 (RER)	Gd4	226,40	0,39	0,16	0,04	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%				
c Transport Wartungssteam	432,00	km	marketfortransport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average (RER)	Gd3	137,39	0,43	0,34	0,04	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%				
c Transport Stahl (niedrig legiert)	376,00	tkm	marketfortransport, freight, lorry, 16-32 metricton, diesel, EURO 6 (RER)	Gd5	70,16	0,12	0,05	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport Kupfer	21,00	tkm	marketfortransport, freight, lorry, 16-32 metricton, diesel, EURO 6 (RER)	Gd5	3,90	0,01	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport Polyurethane	21,00	tkm	marketfortransport, freight, lorry, 16-32 metricton, diesel, EURO 6 (RER)	Gd6	3,90	0,01	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport GFK	13076,00	tkm	marketfortransport, freight, lorry, 16-32 metricton, diesel, EURO 6 (RER)	Gd5	1870,09	3,24	1,33	0,33	0,05%	0,04%	0,01%	0,05%				
c Transport CFK	1614,00	tkm	marketfortransport, freight, lorry, 16-32 metricton, diesel, EURO 6 (RER)	Gd6	298,56	0,52	0,21	0,05	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%				
d Stahl (niedrig legiert)	1593,00	kg	steel production, electric, low alloyed (AT)	Gd3	519,19	2,36	1,21	0,14	0,01%	0,03%	0,01%	0,02%				
d Kupfer	46,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)	Gd3	78,35	3,99	0,64	0,17	0,00%	0,04%	0,01%	0,03%				
d Aufbereitung sonstiger Polymerabfälle	296,00	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (RER)	Gd4	296,21	0,44	0,64	0,04	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%				
d Elektrizitätsprodukt aus Verbrennung Polyurethane (50%)	155,00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	Gd4	120,03	0,02	0,02	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Wärme- und Elektrizitätsprodukt aus Verbrennung Polyurethane (50%)	1143,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	Gd4	234,25	0,01	0,03	0,00	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	9147,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)	Gd3	2197,17	5,49	7,92	0,36	0,00%	0,03%	0,00%	0,00%				
d Feinzerkleinerung in Hammermühle	537,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)	Gd4	153,01	0,38	0,55	0,03	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Zerkleinerung in Schneidmühlen	535,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)	Gd3	178,03	0,32	0,46	0,02	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	12966,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)	Gd4	3114,52	7,78	11,22	0,53	0,09%	0,08%	0,09%	0,08%				
d Stickstoffverbrauch Pyrolyse	1077,00	kg	market fornitrogen, liquid (RER)	Gd4	203,73	0,86	0,67	0,06	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%				
d CO2-Emissionen der Pyrolyse	1575,00	kg	Dummy Prozess: Carbon Dioxide Emissions	Gd4	1575,00	0,00	0,00	0,00	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%				
e Vermeidung Energieproduktion für weitere 10 Jahre	-1399350,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)		3351728,00	837285	12074,95	57347	92,65%	90,69%	53,28%	50,81%	92,65%	90,69%	53,28%	50,81%
e Vermeidung von Wärme- und Elektrizitätsproduktion	-1143,00	MJ	market forheat, district industrial, natural gas (Europe without Switzerland)		62,63	0,04	0,02	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
e Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-153,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)		39,15	0,10	0,14	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
e Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-1593,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)	Gd5	3426,03	11,35	9,98	1,54	0,09%	0,12%	0,08%	0,24%	0,09%	0,12%	0,08%	0,24%
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-45,80	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	Gd5	310,26	5,31	13,08	0,26	0,01%	0,05%	0,14%	0,04%	0,01%	0,05%	0,14%	0,04%

(Fortsetzung)

					LCIA-Ergebnisse Barträge				LCIA-Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1%			
Kat. Prozess	Wert	Einheit	emission-Prozess	Gemein-samkeit	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF
					[kg CO2-Eq]	[kg SO2-Eq]	[kg PO4-Eq]	[kg Ethylen-Aq]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
e Vermeidung Kreide (durch GFK)	-6602,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (REF)	G-e6	2532,45	10,85	3,76	1,51	0,07%	0,12%	0,03%	0,24%				
e Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-4047,00	kg	market for glass fibre (GLO)	G-e6	10037,28	62,27	32,17	3,37	0,20%	0,67%	0,25%	0,53%	0,28%	0,67%	0,25%	0,53%
e Vermeidung der Primärproduktion von PE	-149,00	kg	polyethylene production, high density, granulate (REF)		335,52	0,79	0,75	0,13	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%				
e Herstellung von Karbonfasern	-34866,00	kg	market for stream, in chemical industry (RoW)	G-e6	12106,40	35,26	8,23	2,30	0,33%	0,38%	0,06%	0,36%	0,33%	0,38%	0,06%	0,36%
e Herstellung von Karbonfasern	-11838,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	G-e6	4923,42	20,48	11,42	1,10	0,14%	0,22%	0,09%	0,17%				
e Herstellung von Karbonfasern	-370782,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace > 100kW (RoW)	G-e6	27690,27	17,33	6,09	2,28	0,77%	0,19%	0,05%	0,36%	0,77%	0,19%	0,05%	0,36%
e Herstellung von Karbonfasern	-34381,00	kWh	market for electric city, medium voltage (IP)	G-e6	21500,00	83,90	44,35	4,55	0,60%	0,61%	0,34%	0,72%	0,60%	0,91%	0,34%	0,72%
e Herstellung von Karbonfasern	-2059,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	G-e6	8689,91	31,18	154,91	1,74	0,24%	0,34%	1,20%	0,28%	0,24%	0,34%	1,20%	0,28%
e Herstellung von Karbonfasern	-21,00	kg	market for vinyl acetate (RoW)	G-e6	92,06	0,32	5,06	0,05	0,00%	0,00%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,04%	0,01%
Szenario 4.4) Rotor & Reparaturpse					44430,46	145,99	98,46	19,29	107,00%	100,00%	100,03%	100,00%	99,50%	99,25%	99,41%	99,61%
a Demontage des Rotors (Kran)	146,11	MJ	diesel, burned in bulding machine (GLO)	G-e5	14,93	0,09	0,02	0,01	0,03%	0,05%	0,02%	0,04%				
a Zerschneiden der 3 Rotorblätter	6124,00	MJ	diesel, burned in bulding machine (GLO)	G-e6	613,14	3,67	0,69	0,29	1,38%	2,65%	1,00%	1,51%	1,38%	2,65%	1,00%	1,51%
c Transport der zerkleinerten Rotorblätter	1220,00	tkm	market for transport, freight lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	G-e4	226,43	0,39	0,16	0,04	0,51%	0,27%	0,16%	0,21%	0,51%	0,27%	0,16%	0,21%
c Transport Glasfasern	3645,00	tkm	market for transport, freight lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	G-e7	713,63	1,24	0,51	0,13	1,61%	0,85%	0,52%	0,56%	1,61%	0,85%	0,52%	0,56%
c Transport GFK	123,00	tkm	market for transport, freight lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)		22,83	0,04	0,02	0,00	0,05%	0,03%	0,02%	0,02%				
d Recycling des Gusseisens	16207,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	G-e5	5282,15	24,40	12,34	1,44	11,85%	16,44%	12,53%	7,46%	11,85%	16,44%	12,53%	7,46%
d Vorzerkleinerung in Schmelzhütten	112,00	kWh	market for electric city, high voltage (AT)		26,90	0,07	0,10	0,00	0,06%	0,05%	0,10%	0,02%				
d Feinzerkleinerung in Hammermühle	7,78	kWh	market for electric city, high voltage (AT)		1,87	0,00	0,01	0,00	0,00%	0,03%	0,01%	0,00%				
e Vermeidung von Beton	-4,92	m³	concrete, all types to generic market for concrete, normal strength (AT)		1326,00	3,27	2,16	0,24	2,98%	2,24%	2,19%	1,25%	2,98%	2,24%	2,19%	1,25%
e Vermeidung niedriglegierter Stähle	-4768,00	kg	steel production, converter, low alloyed (REF)		10254,44	33,97	29,87	4,61	25,08%	23,27%	30,34%	23,01%	23,08%	23,27%	30,34%	23,01%
e Vermeidung von Gusseisen	-16207,00	kg	cast iron production (REF)	G-e7	25794,69	78,15	51,87	12,46	56,06%	53,53%	52,67%	64,61%	56,06%	53,53%	52,67%	64,61%
e Vermeidung Kreide (durch GFK)	-80,60	kg	market for calcium carbonate, precipitated (REF)		30,92	0,13	0,04	0,02	0,07%	0,09%	0,04%	0,10%				
e Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-49,40	kg	market for glass fibre (GLO)		122,52	0,76	0,39	0,04	0,28%	0,52%	0,40%	0,21%				
Szenario 5.1) Fundament & Recycle					271511,04	993,24	452,32	84,63	109,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,24%	98,93%	97,10%	99,25%
a Aushub (Erdschicht)	156,00	m³	excavator, skid-steer loader (REF)		69,33	0,56	0,14	0,04	0,03%	0,03%	0,09%	0,05%				
a Zerkleinert Stahlbeton (Hydraulhammer)	463064,00	MJ	diesel, burned in bulding machine (GLO)		48367,71	305,33	77,75	22,94	17,81%	34,18%	15,79%	27,10%	17,81%	34,18%	15,79%	27,10%
c Abtransport groß zerkleintes Fundament	357817,00	tkm	market for transport, freight lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)		73534,37	128,00	52,53	13,20	27,15%	14,33%	10,67%	15,60%	27,19%	14,33%	10,67%	15,50%

(Fortsetzung)

				LCIA-Ergebnisse Beträge				LCIA-Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1%				
Kat. Prozess	Wert	Einheit	Prozess	Gemeinsamkeit	GWP [kg CO2-eq]	AP [kg SO2-Äq]	EP [kg PO4-Äq]	POF [kg Ethylen-Äq]	GWP [%]	AP [%]	EP [%]	POF [%]	GWP [%]	AP [%]	EP [%]	POF [%]
c Weitransport des Armierungsstahls	7197,00	-km	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	GLO	1335,75	2,32	0,95	0,24	0,49%	0,25%	0,19%	0,28%				
	13,90	-km	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		2,58	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
	7,32	-km	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		1,36	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
c Transport Polymere	7893,00	kWh	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	GLO	1895,95	4,74	6,63	0,32	0,70%	0,53%	1,39%	0,38%	0,70%	0,53%	1,39%	0,38%
d Zerkleinern mit Pfla- und Backenbrechern	34354,00	kg	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		11359,56	51,61	26,53	3,10	4,18%	5,78%	5,39%	3,58%	4,18%	5,78%	5,39%	3,58%
d Recycling des Stahls zu Stahlbarren	30,50	kg	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		51,95	2,64	0,66	0,11	0,02%	0,30%	0,11%	0,13%	0,04%	0,02%	0,06%	0,02%
d Aufbereitung Polymerabfälle	105,00	kg	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	GLO	104,37	0,16	0,30	0,01	0,04%	0,02%	0,06%	0,02%	0,02%	0,03%	0,00%	0,00%
d Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	57,40	kWh	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		42,70	0,01	0,01	0,00	0,02%	0,03%	0,00%	0,00%	0,02%	0,03%	0,00%	0,00%
d Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	403,00	MJ	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		83,32	0,01	0,01	0,00	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%
c Vermeidung von Beton	-219,00	m³	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	GLO	59023,02	145,70	96,03	10,73	21,74%	16,31%	10,51%	12,67%	21,74%	16,31%	10,51%	12,57%
e Vermeidung von Stahl (niedriglegiert)	-34854,00	kg	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		74955,82	243,30	216,36	33,71	27,61%	27,80%	44,35%	39,84%	27,61%	27,80%	44,35%	39,84%
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-30,40	kg	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		205,93	3,53	12,00	0,17	0,08%	0,39%	2,44%	0,20%	0,04%	0,03%	0,05%	0,05%
e Vermeidung der Primärproduktion von PE	-52,60	kg	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	GLO	118,45	0,28	0,26	0,05	0,04%	0,03%	0,05%	0,05%	0,04%	0,03%	0,05%	0,05%
e Vermeidung von Wärmeproduktion	-403,00	MJ	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		22,08	0,02	0,01	0,00	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
e Vermeidung von Elektrizitätsproduktion	-57,00	kWh	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		13,69	0,03	0,05	0,00	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%
Szenario 5.2) Turm & Recycle					355259,74	1325,46	1060,70	151,95	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,19%	96,85%	63,20%	98,61%
a Demontage des Turms (Kran)	290,00	MJ	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	GLO	29,04	0,18	0,05	0,01	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%
a Zerkleinern und Trennung der Turmmaterialien mit Hydraulischen (Bagger)	7400,00	MJ	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		740,94	4,68	1,19	0,35	0,21%	0,35%	0,11%	0,23%	0,21%	0,35%	0,11%	0,23%
c Transport Stahl	31759,00	-km	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		5894,43	10,22	4,19	1,05	1,65%	0,77%	0,40%	0,59%	1,65%	0,77%	0,40%	0,60%
c Transport Aluminium	150,00	-km	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)	GLO	29,70	0,05	0,02	0,01	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
c Transport Kupfer	76,00	-km	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		14,11	0,02	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
d Recycling des Stahls (zu niedrig legiert; Stahl)	153972,00	kg	marktfortransport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		43631,36	193,22	101,90	11,89	12,28%	14,95%	9,61%	7,93%	12,28%	14,95%	9,61%	7,93%

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA-Ergebnisse Beiträge				LCIA-Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1 %				
					GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	
					[kg CO2-Eq]	[kg SO2-Eq]	[kg PO4-Eq]	[kg Ethylen-Eq]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
d Recycling des Aluminiums (zu Gusslegierung)	727,00	kg	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner (RER)		656,75	2,61	1,48	0,16	0,18%	0,20%	0,14%	0,11%					
d Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	130,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)		256,14	14,57	3,07	0,62	0,03%	1,10%	0,29%	0,41%					
e Vermeidung von niedrig legiertem Stahl	-133872,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (RER)		287915,39	953,72	838,69	129,48	81,04%	71,95%	79,07%	85,21%	81,04%	71,95%	79,07%	85,21%	85,21%
e Vermeidung von Aluminium (Gusslegierung)	-727,00	kg	aluminium production, primary, cast alloy slab from continuous casting (RoW)		14922,63	121,70	43,30	7,41	4,20%	9,19%	4,13%	4,98%	4,20%	9,18%	4,13%	4,98%	4,98%
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-168,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electro-winning process (GLO)		1138,05	19,45	56,31	0,95	0,32%	1,47%	6,25%	0,53%					
Szenario 5.3) Gondel & Recycle					277033,13	1554,41	1490,43	108,84	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,03%	99,94%	99,70%	99,23%	99,23%
a Demontage der Gondel (Kran)	256,80	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	G3	26,72	0,17	0,04	0,01	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%
c Transport Stahl (niedrig legiert)	698,00	km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		123,98	0,21	0,09	0,02	0,04%	0,01%	0,01%	0,02%	0,04%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%
c Transport Stahl (hochlegiert)	5071,00	km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		941,17	1,63	0,67	0,17	0,34%	0,10%	0,04%	0,15%	0,34%	0,10%	0,04%	0,15%	0,15%
c Transport Gusseisen	7518,00	km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		1395,33	2,42	0,99	0,25	0,50%	0,15%	0,07%	0,23%	0,50%	0,15%	0,07%	0,23%	0,23%
c Transport Aluminium	525,00	km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		97,44	0,17	0,07	0,02	0,04%	0,01%	0,00%	0,02%	0,04%	0,01%	0,00%	0,02%	0,02%
c Transport Kupfer	538,00	km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		109,32	0,19	0,08	0,02	0,04%	0,01%	0,01%	0,02%	0,04%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%
c Transport GFK	1131,00	km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		239,91	0,36	0,15	0,04	0,08%	0,02%	0,01%	0,03%	0,08%	0,02%	0,01%	0,03%	0,03%
c Transport Schmiröl	38,00	km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (RER)		7,05	0,01	0,01	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
d Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	2814,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)		917,13	4,17	2,14	0,25	0,33%	0,25%	0,14%	0,23%	0,33%	0,26%	0,14%	0,23%	0,23%
d Recycling des Stahls zu hochlegiertem Stahl	9057,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (RER)		43016,43	207,25	169,26	12,23	15,53%	13,00%	13,37%	11,24%	15,53%	13,00%	13,37%	11,24%	11,24%
d Recycling des Gusseisens	31550,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)		10328,36	46,92	24,12	2,82	3,73%	2,94%	1,62%	2,59%	3,73%	2,94%	1,62%	2,59%	2,59%
d Recycling des Aluminiums (zu Gusslegierung)	2279,00	kg	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner (RER)		2149,13	8,55	4,64	0,53	0,78%	0,54%	0,32%	0,48%	0,78%	0,54%	0,32%	0,48%	0,48%
d Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	1291,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (RER)		2198,84	111,95	23,58	4,76	0,79%	7,02%	1,58%	4,39%	0,79%	7,02%	1,58%	4,39%	4,39%
d Vorzerkleinerung in Schneidrollen	1026,00	kWh	market for electric city, high voltage (AT)		246,45	0,02	0,69	0,04	0,09%	0,04%	0,06%	0,04%	0,09%	0,04%	0,06%	0,04%	0,04%
d Feinzerkleinerung in Hammermühle	71,00	kWh	market for electric city, high voltage (AT)		17,05	0,04	0,06	0,00	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
d Zufuhr von Wärmeenergie aus Erdgas	536,00	MJ	heat production, natural gas, at boiler atmospheric non-modulating <100kW (Europe without Switzerland)		39,31	0,03	0,01	0,00	0,01%	0,03%	0,00%	0,00%	0,01%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	eintr. ecoinvent-Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA-Ergebnisse Beiträge					LCIA-Ergebnisse Relativ					Cut-Off 1%				
					GWP	AP	EP	POF	[kg Ethylen-Äq]	GWP	AP	EP	POF	[%]	GWP	AP	EP	POF	[%]
					[kg CO ₂ -Äq]	[kg SO ₂ -Äq]	[kg PO ₄ -Äq]			[%]	[%]	[%]	[%]		[%]	[%]	[%]	[%]	
d Zufuhr von elektrischer Energie	123,00	kWh	market for electric city, high voltage (AT)		29,55	0,07	0,11	0,01	0,01	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%				
d Verbrauch von Propangas	3,00	kg	market for propane (GLO)		3,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
d Verfeinerung von Kohlenwasserstoffen	8038,00	MJ	fuel production, heavy fuel oil, at industrial furnace, JMW (Europe without Switzerland)		818,01	4,90	0,23	0,26	0,26	0,30%	0,31%	0,02%	0,24%	0,02%	0,30%				
e Vermeidung von nicht-legiertem Stahl	-2814,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (REF)		6052,01	20,05	17,53	2,72	2,72	2,18%	1,25%	1,18%	2,50%	1,18%	2,18%	1,26%	1,18%	2,50%	1,18%
e Vermeidung von hochlegiertem Stahl	-21362,00	kg	steel production, electric, chromium steel 18/8 (REF)		98210,24	473,15	454,92	27,92	27,92	35,45%	29,68%	50,52%	25,65%	50,52%	35,45%	29,68%	50,52%	25,65%	50,52%
e Vermeidung von Gusseisen	-31890,00	kg	cast iron production (REF)		50437,08	152,81	101,41	24,37	24,37	16,21%	9,55%	6,80%	22,39%	16,21%	16,21%	9,58%	6,80%	22,39%	16,21%
e Vermeidung von Aluminium (Gusslegierung)	-2379,00	kg	aluminum production, primary, cast alloy slab from continuous casting (RefW)		48532,11	393,23	143,31	24,28	24,28	17,63%	24,98%	9,62%	22,29%	17,63%	17,63%	24,98%	9,62%	22,29%	17,63%
e Vermeidung von Kupfer (Kathodenmaterial)	-1291,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)		8745,44	149,80	509,58	7,32	7,32	3,16%	9,40%	54,19%	6,73%	3,16%	3,16%	9,40%	54,19%	6,73%	3,16%
e Vermeidung Kreide (durch GFK)	-741,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (REF)		251,27	1,22	0,39	0,17	0,17	0,10%	0,08%	0,03%	0,16%	0,10%	0,10%	0,08%	0,03%	0,16%	0,10%
e Vermeidung von Glasfasern (durch GFK)	-454,00	kg	market for glass fibre (GLO)		1126,00	6,99	3,01	0,36	0,36	0,41%	0,44%	0,24%	0,35%	0,41%	0,41%	0,44%	0,24%	0,35%	0,41%
e Vermeidung Herstellung Schmieröl	-441,00	kg	lubricating oil production (REF)		670,13	2,49	2,29	0,25	0,25	0,24%	0,15%	0,15%	0,23%	0,24%	0,24%	0,15%	0,15%	0,23%	0,24%
Szenario 5.4) Retox & Recycle					135164,32	411,72	385,37	34,85	34,85	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,16%	93,33%	57,87%	98,80%	98,80%
a Demontage des Rotors (Kinn)	140,10	MJ	diesel, burned in building machines (GLO)	Gd5	14,93	0,09	0,02	0,01	0,01	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%				
a Zerschneiden der 3 Retorblätter	6124,00	MJ	diesel, burned in building machine (GLO)	Gd6	613,14	3,87	0,99	0,25	0,25	0,45%	0,94%	0,26%	0,53%	0,45%	0,45%	0,94%	0,26%	0,53%	0,45%
c Transport Stahl (niedrig legiert)	378,00	·km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gd5	70,16	0,12	0,05	0,01	0,01	0,05%	0,03%	0,01%	0,04%	0,05%	0,05%	0,03%	0,01%	0,04%	0,05%
c Transport Gusseisen	3845,00	·km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gd7	713,63	1,24	0,51	0,13	0,13	0,53%	0,30%	0,13%	0,37%	0,53%	0,53%	0,30%	0,13%	0,37%	0,53%
c Transport Kupfer	21,00	·km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gd5	3,90	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c Transport Polymere	21,00	·km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gd6	3,90	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c Transport GFK	1007,600	·km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gd6	1870,09	3,24	1,33	0,33	0,33	1,38%	0,79%	0,35%	0,96%	1,38%	1,38%	0,79%	0,35%	0,96%	1,38%
c Transport OFK	1614,00	·km	market for transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gd6	298,56	0,52	0,21	0,05	0,05	0,22%	0,13%	0,06%	0,15%	0,22%	0,22%	0,13%	0,06%	0,15%	0,22%
d Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	1593,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	Gd3	519,19	2,36	1,21	0,14	0,14	0,38%	0,57%	0,31%	0,41%	0,38%	0,38%	0,57%	0,31%	0,41%	0,38%
d Recycling des Gusseisens	19207,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	Gd5	5202,13	24,90	12,34	1,44	1,44	3,91%	5,83%	3,20%	4,13%	3,91%	3,91%	5,83%	3,20%	4,13%	3,91%
d Recycling des Kupfers (zu Kathodenmaterial)	46,00	kg	treatment of copper scrap by electrolytic refining (REF)	Gd3	78,35	3,99	0,64	0,17	0,17	0,06%	0,57%	0,22%	0,49%	0,06%	0,06%	0,57%	0,22%	0,49%	0,06%
d Aufbereitung Polymerschäufel	298,00	kg	treatment of waste plastic, mixed, recycling (REF)	Gd4	256,21	0,44	0,64	0,04	0,04	0,22%	0,11%	0,22%	0,11%	0,22%	0,22%	0,11%	0,22%	0,11%	0,22%

LCIA-Ergebnisse										LCIA-Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1%			
Kat.	Prozess	Wert	Einheit	end-of-line-Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA-Ergebnisse Beiträge				LCIA-Ergebnisse Relativ				Cut-Off 1%			
						GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF	GWP	AP	EP	POF
						[kg CO ₂ -eq]	[kg SO ₂ -eq]	[kg PO ₄ -eq]	[kg Ethylen-Aq]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
d	Elektrizitätsprodukt aus Verbrennung Polymere (50%)	193,00	kWh	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	G44	120,03	0,02	0,02	0,00	0,09%	0,03%	0,00%	0,00%	0,09%	0,03%	0,00%	0,00%
d	Wärmeproduktion aus Verbrennung Polymere (50%)	1143,00	MJ	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)	G44	234,25	0,04	0,03	0,00	0,17%	0,01%	0,01%	0,01%	0,17%	0,01%	0,01%	0,01%
d	Vorzerkleinerung in Schneidmühlen	9147,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)	G43	2197,17	5,49	7,92	0,38	1,63%	1,33%	2,05%	1,08%	1,63%	1,33%	2,05%	1,08%
d	Feinzerkleinerung in Hammermühle	637,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)	G44	153,01	0,38	0,55	0,03	0,11%	0,09%	0,14%	0,06%	0,11%	0,09%	0,14%	0,06%
d	Zerkleinerung in Schneidmühlen	533,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)	G43	128,03	0,32	0,46	0,02	0,09%	0,09%	0,12%	0,06%	0,09%	0,09%	0,12%	0,06%
d	Elektrischer Energieverbrauch Pyrolyse	12966,00	kWh	market forelectr city, high voltage (AT)	G44	3114,52	7,78	11,22	0,53	2,30%	1,69%	2,91%	1,53%	2,30%	1,69%	2,91%	1,53%
d	Stickstoffverbrauch Pyrolyse	1077,00	kg	market for nitrogen, liquid (REF)	G44	233,73	0,86	0,67	0,05	0,15%	0,21%	0,17%	0,14%	0,15%	0,21%	0,17%	0,14%
d	CO ₂ -Emissionen der Pyrolyse	1575,00	kg	Durmy Prozess: Carbon Dioxide-Emissions	G44	1975,00	0,00	0,00	0,00	1,17%	0,00%	0,00%	0,00%	1,17%	0,00%	0,00%	0,00%
e	Vermeidung von niedrig legierten Stahl	-1593,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (REF)	G45	3426,03	11,35	9,98	1,54	2,53%	2,73%	2,59%	4,42%	2,53%	2,73%	2,59%	4,42%
e	Vermeidung von Gusseisen	-16207,00	kg	copper production (REF)	G47	25794,69	78,15	51,87	12,46	16,08%	18,69%	13,46%	35,76%	19,08%	13,69%	13,46%	35,76%
e	Vermeidung von Kupfer (Kathodmaterial)	-45,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process (GLO)	G45	310,26	5,31	10,38	0,20	0,23%	1,23%	4,69%	0,75%	0,23%	1,23%	4,69%	0,75%
e	Vermeidung der Primärproduktion von PE	-6802,00	kg	polyethylene production, high density, granulate (REF)	G46	2532,45	10,85	3,46	1,51	1,87%	2,64%	0,90%	4,34%	1,87%	2,64%	0,90%	4,34%
e	Vermeidung Krebse (durch CFK)	-4047,00	kg	market for calcium carbonate, precipitated (REF)	G46	10037,28	62,27	32,17	3,37	7,43%	15,12%	8,35%	9,58%	7,43%	15,12%	8,35%	9,58%
e	Vermeidung von Glasfasern (durch CFK)	-75,00	kg	market for glass fibre (GLO)	G46	168,89	0,40	0,58	0,07	0,12%	0,10%	0,10%	0,19%	0,12%	0,10%	0,10%	0,19%
e	Herstellung von Karbonfasern	-34896,00	kg	market for steam, in chemical industry (RoW)	G46	12100,02	35,20	6,23	2,30	8,96%	8,59%	2,14%	6,59%	8,96%	8,59%	2,14%	6,59%
e	Herstellung von Karbonfasern	-11836,00	kg	market for nitrogen, liquid (RoW)	G46	4823,42	20,46	11,42	1,10	3,64%	4,97%	2,96%	3,16%	3,64%	4,97%	2,96%	3,16%
e	Herstellung von Karbonfasern	-370780,00	MJ	heat production, natural gas, at industrial furnace > 100kW (RoW)	G46	27590,27	17,33	6,09	2,28	20,63%	4,21%	1,58%	6,55%	20,63%	4,21%	1,58%	6,55%
e	Herstellung von Karbonfasern	-34381,00	kWh	market forelectr city, medium voltage (JP)	G46	21500,00	83,90	44,35	4,53	15,98%	20,38%	11,51%	12,99%	15,98%	20,38%	11,51%	12,99%
e	Herstellung von Karbonfasern	-2059,00	kg	market for acrylonitrile (GLO)	G46	8689,81	31,18	164,91	1,74	8,43%	7,57%	40,20%	5,00%	8,43%	7,57%	40,20%	5,00%
e	Herstellung von Karbonfasern	-21,00	kg	market for vinyl acetate (RoW)	G46	92,06	0,32	5,06	0,05	0,07%	0,03%	1,31%	0,15%	0,07%	0,03%	1,31%	0,15%
e	Vermeidung von Wärmeproduktion	-1143,00	MJ	market for heat, district industrial, natural gas (Europe without Switzerland)	G46	62,63	0,04	0,02	0,01	0,05%	0,01%	0,00%	0,02%	0,05%	0,01%	0,00%	0,02%
e	Vermeidung von																

(Fortsetzung)

Kat. Prozess	Wert	Einheit	Prozess	Gemeinsamkeit	LCIA-Ergebnisse Beträge					LCIA-Ergebnisse Relativ					Cut-Off1%				
					GWP	AP	EP	POF	[kg Ethylen-Äq]	GWP	AP	EP	POF	[%]	GWP	AP	EP	POF	[%]
c Transport GFK	15760,00	tkm	markt für transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)		2925,04	5,07	2,08	0,52		4,91%	3,36%	1,81%	2,91%		4,91%	3,36%	1,81%	2,91%	
c Transport CFK	645,00	tkm	markt für transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)		119,71	0,21	0,09	0,02		0,20%	0,14%	0,07%	0,12%						
c Transport Stahl (niedrig legiert)	378,00	tkm	markt für transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Cc5	70,16	0,12	0,05	0,01		0,12%	0,08%	0,04%	0,07%						
c Transport Gusseisen	3045,00	tkm	markt für transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc7	713,63	1,24	0,51	0,13		1,20%	0,22%	0,44%	0,71%		1,20%	0,02%	0,44%	0,71%	
c Transport Kupfer	21,00	tkm	markt für transport, freight, lorry, 16-32 metric ton, diesel, EURO 6 (REF)	Gc5	3,88	0,01	0,00	0,00		0,01%	0,00%	0,00%	0,00%						
d Elektrizitätsproduktion aus Verbrennung Polymeren	371,00	kWh	Treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)		273,88	0,04	0,03	0,00		0,46%	0,13%	0,03%	0,02%		0,46%	0,03%	0,03%	0,02%	
d Wärme- und Kälteproduktion aus Verbrennung Polymeren	2608,00	MJ	Treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)		554,53	0,09	0,07	0,01		0,90%	0,26%	0,06%	0,03%		0,90%	0,06%	0,06%	0,03%	
d Veredelung von Kupfer	9147,00	kWh	markt für electricity, high voltage (AT)	Cc3	2107,17	5,40	7,02	0,38		3,59%	3,54%	6,08%	2,09%		3,69%	3,64%	6,08%	2,09%	
d Veredelung des Epoxidharzes zur Prozessierung	43880,00	MJ	Treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration (RoW)		13633,75	2,21	1,71	0,15		22,90%	1,47%	1,49%	0,81%		22,90%	1,47%	1,49%	0,81%	
d Zerkleinerung in Schmelzrührern	533,00	kWh	markt für electricity, high voltage (AT)	Cc3	128,03	0,32	0,46	0,02		0,22%	0,21%	0,40%	0,12%						
d Recycling des Stahls (zu niedrig legiertem Stahl)	1583,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	Gc3	519,18	2,30	1,21	0,14		0,97%	1,56%	1,05%	0,79%		0,87%	1,56%	1,05%	0,79%	
d Recycling des Gusseisens	16207,00	kg	steel production, electric, low-alloyed (AT)	Gc5	5282,16	24,00	12,34	1,44		8,87%	15,91%	10,72%	8,02%		8,87%	15,91%	10,72%	8,02%	
d Recycling des Kupfers (zu Kathodamaterial)	46,00	kg	Treatment of copper scrap by electrolytic refining (REF)	Gc3	79,35	3,99	0,84	0,17		0,13%	2,54%	0,73%	0,95%						
c Veredelung von Wärme- und Kälteproduktion aus Stein Kohle	2608,00	MJ	markt für heat, district industrial, natural gas (Europe without Switzerland)		142,91	0,10	0,04	0,01		0,24%	0,07%	0,03%	0,07%		0,24%	0,07%	0,03%	0,07%	
e Veredelung von Elektrizitätsproduktion	-371,00	kWh	markt für electricity, high voltage (AT)		89,12	0,22	0,32	0,02		0,15%	0,15%	0,28%	0,08%						
e Veredelung von Wärme- und Kälteproduktion aus Stein Kohle	-43960,00	MJ	Heat and power co-generation, hard coal (CE)		2008,00	6,26	6,20	0,35		4,38%	4,15%	5,45%	1,97%		4,38%	4,15%	5,45%	1,97%	
e Veredelung von Koks-Produktion durch GFK-Recovery	-1667,00	kg	coke production (RoW)		53,10	0,24	0,21	0,02		0,09%	0,16%	0,18%	0,09%						
e Veredelung der Produktion von Ton-Erden durch GFK-Recovery	-1084,00	kg	markt für clay (RoW)		12,08	0,07	0,03	0,01		0,02%	0,05%	0,03%	0,03%						
e Veredelung von niedrig legiertem Stahl	-1593,00	kg	steel production, converter, low-alloyed (REF)	Gc5	5426,03	11,35	9,98	1,54		5,75%	7,53%	8,67%	8,58%		5,75%	7,53%	8,67%	8,58%	
e Veredelung von Gusseisen	-15207,00	kg	cast iron production (REF)	Gc7	25764,69	78,15	51,87	12,46		43,32%	51,82%	45,06%	69,42%		43,32%	51,82%	45,06%	69,42%	
e Veredelung von Kupfer (Kathodamaterial)	-45,00	kg	copper production, cathode, solvent extraction and electro-winning process (G-O)	Cc5	310,26	5,31	18,08	0,26		0,52%	3,52%	15,70%	1,45%		0,52%	3,52%	15,70%	1,45%	

8 Literaturverzeichnis

- Alsaleh, A., & Sattler, M. (2019). Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(4), 887–903. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01678-0>
- Baas, J., Schotten, M., Plume, A., Côté, G., & Karimi, R. (2020). Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. *Quantitative Science Studies*, 1(1), 377–386. https://doi.org/10.1162/qss_a_00019
- BDSV. (2012). *BREF für Großschredderanlagen—Standpunkt der deutschen Schredderwirtschaft*.
- Beemsterboer, S., Baumann, H., & Wallbaum, H. (2020). Ways to get work done: A review and systematisation of simplification practices in the LCA literature. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(11), 2154–2168. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01821-w>
- BMK. (2022). *Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft: Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- BMK. (2024a). *Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2023*. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- BMK. (2024b). *Integrierter österreichischer Netzinfrastukturplan*. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- BML. (2021). *Masterplan Rohstoffe 2030*. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.
- Bonou, A., Laurent, A., & Olsen, S. I. (2016). Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. *Applied Energy*, 180, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.058>
- Botas, J. A., Moreno, J., Espada, J. J., Serrano, D. P., & Dufour, J. (2017). Recycling of used lubricating oil: Evaluation of environmental and energy performance by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.010>
- Caiardi, F., Azzaro-Pantel, C., & Le-Boulch, D. (2023). Contribution of Life Cycle Assessment for the objective of carbon neutrality: Bibliographic review. *MATEC Web of Conferences*, 379, 04001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202337904001>
- Cao, Y., Meng, Y., Zhang, Z., Yang, Q., Li, Y., Liu, C., & Ba, S. (2024). Life cycle environmental analysis of offshore wind power: A case study of the large-scale offshore wind farm in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114351>
- Cong, N., Song, Y., Zhang, M., & Wu, W. (2023). Life cycle assessment of carbon reduction potential of EoL wind turbine blades disposal scenarios in China.

- Environmental Impact Assessment Review*, 100.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107072>
- Delaney, E. L., Leahy, P. G., McKinley, J. M., Gentry, T. R., Nagle, A. J., Elberling, J., & Bank, L. C. (2023). Sustainability Implications of Current Approaches to End-of-Life of Wind Turbine Blades—A Review. *Sustainability*, 15(16), 12557. <https://doi.org/10.3390/su151612557>
- Delogu, M., Berzi, L., Dattilo, C. A., & Del Pero, F. (2023). Definition and sustainability assessment of recycling processes for bonded rare earths permanent magnets used on wind generators. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 9(2), 608–654. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2095142>
- Deutsches Umweltbundesamt. (2021). *Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen*.
- Deutsches Umweltbundesamt. (2022). *Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter*.
- Diez-Cañamero, B., & Mendoza, J. M. F. (2023). Circular economy performance and carbon footprint of wind turbine blade waste management alternatives. *Waste Management*, 164, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.041>
- Douziech, M., Ravier, G., Jolivet, R., Pérez-López, P., & Blanc, I. (2021). How Far Can Life Cycle Assessment Be Simplified? A Protocol to Generate Simple and Accurate Models for the Assessment of Energy Systems and Its Application to Heat Production from Enhanced Geothermal Systems. *Environmental Science & Technology*, 55(11), 7571–7582. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06751>
- Echavarria, E., Hahn, B., Van Bussel, G. J. W., & Tomiyama, T. (2008). Reliability of Wind Turbine Technology Through Time. *Journal of Solar Energy Engineering*, 130(3), 031005. <https://doi.org/10.1115/1.2936235>
- ecoinvent Association. (2024). *Ecoinvent v3.11 database*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zürich (Switzerland).
- E-Control. (2025). *Brutto-Stromerzeugung nach Energieträgern*. E-Control. https://www.e-control.at/statistik/e-statistik/charts/str_ges_neu_erz, Abrufdatum: 09.08.2025
- Eisl, S., & Schlund, S. (2024). Turning in Circles—Nutzung des Potenzials der Kreislaufwirtschaft im Betrieb von Windkraftanlagen. *Industry 4.0 Science*, 2024(5). <https://doi.org/10.30844/I4SD.24.5.90>
- EK. (2016). *Guide for interpreting life cycle assessment result*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/171315>
- EK. (2019). *Was ist der europäische Grüne Deal?* Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2775/944554>
- EK. (2023). *GHG emissions of all world countries*. Publications Office of the European Union. doi:10.2760/953332, JRC134504
- EK - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook—General guide for Life Cycle Assessment—Detailed guidance* (1. Aufl.). Publications Office of the European Union.

- Eligüzel, İ. M., & Özceylan, E. (2022). A bibliometric, social network and clustering analysis for a comprehensive review on end-of-life wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 380. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135004>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2021a). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change 2021 Reprint*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2021b). *The Nature Imperative: How the circular economy tackles biodiversity loss*.
- Energiewerkstatt. (2023). *Österreichs Windpotential bei unterschiedlichem Ausmaß der Flächennutzung*. Energiewerkstatt.
- Epoxy Resin Committee. (2015). *Epoxidharze bei Windenergieanwendungen*.
- EU. (2024). *EU's Digital Product Passport: Advancing transparency and sustainability*. <https://data.europa.eu/de/news-events/news/eus-digital-product-passport-advancing-transparency-and-sustainability>, Abrufdatum: 19.08.2025
- EuRIC AISBL. (2020). *Fakten Metallrecycling*.
- Fachagentur Windenergie an Land. (2023). *Rückbau und Recycling: Grundlagen, Vorgaben, Umsetzung*.
- Feng, H., Zhao, J., Hollberg, A., & Habert, G. (2023). Where to focus? Developing a LCA impact category selection tool for manufacturers of building materials. *Journal of Cleaner Production*, 405, 136936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136936>
- Frischknecht, R. (2007). *Cut-off vs. Avoided burden in metals' recycling: In view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency*.
- Garrett, P., & Rønde, K. (2011). *Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V90-2.0 MW Gridstreamer Wind Plant*. Vestas Wind Systems A/S.
- Gasch, R., Twele, J., Bade, P., Conrad, W., Heilmann, C., Kaiser, K., Kortenkamp, R., Kühn, M., Langreder, W., Liersch, J., Maurer, J., Reuter, A., Schubert, M., Sundermann, B., & Stoffel, A. (2005). *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb* (R. Gasch & J. Twele, Hrsg.; 4. Aufl.). B. G. Teubner. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-99446-2>
- Gast, L., Meng, F., & Morgan, D. (2024). Assessing the circularity of onshore wind turbines: Using material flow analysis for improving end-of-life resource management. *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107468. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107468>
- Gennitsaris, S., Sagani, A., Sofianopoulou, S., & Dedoussis, V. (2023). Integrated LCA and DEA approach for circular economy-driven performance evaluation of wind turbine end-of-life treatment options. *Applied Energy*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120951>
- Gervásio, H., Rebelo, C., Moura, A., Veljkovic, M., & Simões da Silva, L. (2014). Comparative life cycle assessment of tubular wind towers and foundations—Part 2: Life cycle analysis. *Engineering Structures*, 74, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.02.041>

- Gewessler, L. (2021). Nachhaltigkeit: Zentrales Anliegen des Klimaschutzministeriums. *Nachhaltigkeits Recht*, 1(1), 6–13. <https://doi.org/10.33196/nr202101000601>
- Gómez-Navarro, T., Stascheit, C., Díaz-Bello, D., & Vargas-Salgado, C. (2024). An agile life cycle assessment for the deployment of photovoltaic energy systems in the built environment. *Energy, Sustainability and Society*, 14(1), 60. <https://doi.org/10.1186/s13705-024-00488-7>
- Google LLC. (2024). *Google Maps*. <https://www.google.at/maps>, Abrufdatum: 10.12.2025
- Gradin, K. T., & Björklund, A. (2021). The common understanding of simplification approaches in published LCA studies—A review and mapping. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(1), 50–63. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01843-4>
- GWEC. (2024). *Global Wind Report 2024*. Global Wind Energy Council.
- Hamilton, W. L., Leskovec, J., & Jurafsky, D. (2018). *Diachronic Word Embeddings Reveal Statistical Laws of Semantic Change* (arXiv:1605.09096). arXiv. <http://arxiv.org/abs/1605.09096>
- Hanes, R., Ghosh, T., Key, A., & Eberle, A. (2021). The Circular Economy Lifecycle Assessment and Visualization Framework: A Case Study of Wind Blade Circularity in Texas. *Frontiers in Sustainability*, 2. Scopus. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.671979>
- Hau, E. (2016). *Windkraftanlagen*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53154-9>
- Hauschild, M. Z. (Hrsg.). (2018). Introduction to LCA Methodology. In *Life cycle Assessment: Theory and Practice* (S. 59–66). Springer.
- Hinde, S., & Spackman, E. (2015). Bidirectional Citation Searching to Completion: An Exploration of Literature Searching Methods. *PharmacoEconomics*, 33(1), 5–11. <https://doi.org/10.1007/s40273-014-0205-3>
- Hogberg, S., Holboll, J., Mijatovic, N., Jensen, B. B., & Bendixen, F. B. (2017). Direct Reuse of Rare Earth Permanent Magnets—Coating Integrity. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(4), 1–9. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2636804>
- Hoinkis, J. (2016). *Chemie für Ingenieure* (14., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage). Wiley-VCH.
- Holcim AG. (2011). *Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton*.
- Huijbregts, M. A. J., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hendriks, H. W. M., Hungerbühler, K., & Hendriks, A. J. (2010). Cumulative Energy Demand As Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production. *Environmental Science & Technology*, 44(6), 2189–2196. <https://doi.org/10.1021/es902870s>
- IEC. (2019). *Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements (IEC 61400-1:2019)*.
- IG Windkraft. (2025). *Windkraft in Österreich*. <https://www.igwindkraft.at/aktuelles/windkraft-in-oesterreich>, Abrufdatum: 09.08.2025

- ISO. (2006a). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework (ISO 14040:2006(E))*. International Organization for Standardization (ISO).
- ISO. (2006b). *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines (ISO 14044:2006(E))*. International Organization for Standardization (ISO).
- ISO. (2015). *Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2015)*.
- Jacquet, L., Le Duigou, A., & Kerbrat, O. (2024). A Proposal for a Carbon Fibre-Manufacturing Life-Cycle Inventory: A Case Study from the Competitive Sailing Boat Industry. *Journal of Composites Science*, 8(7), 276. <https://doi.org/10.3390/jcs8070276>
- Jani, H. K., Singh Kachhwaha, S., Nagababu, G., & Das, A. (2022). A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials. *Materials Today: Proceedings*, 62, 7124–7130. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.049>
- Jensen, J. P. (2019). Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. *Wind Energy*, 22(2), 316–326. <https://doi.org/10.1002/we.2287>
- Jiang, L., Xiang, D., Tan, Y. F., Nie, Y. H., Cao, H. J., Wei, Y. Z., Zeng, D., Shen, Y. H., & Shen, G. (2018). Analysis of wind turbine Gearbox's environmental impact considering its reliability. *Journal of Cleaner Production*, 180, 846–857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.078>
- Jin, H., Afiuny, P., McIntyre, T., Yih, Y., & Sutherland, J. W. (2016). *Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling*. 48, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.013>
- Johnson, J., Reck, B. K., Wang, T., & Graedel, T. E. (2008). The energy benefit of stainless steel recycling. *Energy Policy*, 36(1), 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.028>
- Johst, P., Kucher, M., Bühl, M., Schulz, P., Kupfer, R., Santos, R. M., Carneiro, C., & Böhm, R. (2023). *Identification and environmental analysis of ecosystems for various repurposing applications of decommissioned large-scale wind turbine blades* (Falzon B.G. & McCarthy C., Hrsg.). International Committee on Composite Materials. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85187545360&partnerID=40&md5=594cfd198114de173de38987d620b4b5>
- Joustra, J., Flipsen, B., & Balkenende, R. (2021). Structural reuse of wind turbine blades through segmentation. *Composites Part C: Open Access*, 5, 100137. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100137>
- Kasner, R. (2022). The environmental efficiency of materials used in the lifecycle of a wind farm. *Sustainable Materials and Technologies*, 34, e00512. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00512>
- Kirchherr, J., Yang, N.-H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 107001. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>

- Klenk, F., Häfner, B., Lanza, G., & Wagner, M. (2019). Kreislaufwirtschaft in globalen Wertschöpfungsnetzwerken. *Industrie 4.0 Management*, 2019(6), 29–32. https://doi.org/10.30844/I40M_19-6_S25-28
- Köck, B., Friedl, A., Serna Loaiza, S., Wukovits, W., & Mihalyi-Schneider, B. (2023). Automation of Life Cycle Assessment—A Critical Review of Developments in the Field of Life Cycle Inventory Analysis. *Sustainability*, 15(6), 1–40. <https://doi.org/10.3390/su15065531>
- Kylili, A. (2022). Environmental assessment of wind turbines and wind energy. In *Environmental assessment of wind turbines and wind energy*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85138360610&doi=10.1016%2fB978-0-12-817111-0.00004-8&partnerID=40&md5=27b950f80a8a0c6a7aa46f38addb2095>
- Levy, Y., & Ellis, T. J. (2006). A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research. *Informing Science: The International Journal of an Emerging Transdiscipline*, 9, 181–212. <https://doi.org/10.28945/479>
- Li, C., Mogollón, J. M., Tukker, A., & Steubing, B. (2022). Environmental Impacts of Global Offshore Wind Energy Development until 2040. *Environmental Science and Technology*, 56(16), 11567–11577. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02183>
- Liu, P., Liu, L., Xu, X., Zhao, Y., Niu, J., & Zhang, Q. (2021). Carbon footprint and carbon emission intensity of grassland wind farms in Inner Mongolia. *Journal of Cleaner Production*, 313. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127878>
- Martínez, E., Latorre-Biel, J. I., Jiménez, E., Sanz, F., & Blanco, J. (2018). Life cycle assessment of a wind farm repowering process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.044>
- Mello, G., Ferreira Dias, M., & Robaina, M. (2022). Evaluation of the environmental impacts related to the wind farms end-of-life. *Energy Reports*, 8, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.024>
- Mendecka, B., & Lombardi, L. (2019). Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 462–480. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.019>
- Mendoza, J. M. F., Gallego-Schmid, A., Velenturf, A. P. M., Jensen, P. D., & Ibarra, D. (2022). Circular economy business models and technology management strategies in the wind industry: Sustainability potential, industrial challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 112523. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112523>
- Mendoza, J. M. F., & Pigosso, D. C. A. (2023). How ready is the wind energy industry for the circular economy? *Sustainable Production and Consumption*, 43, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.016>
- Mishnaevsky, L. (2021). Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions. *Materials*, 14(5), 1124. <https://doi.org/10.3390/ma14051124>

- Mitterpach, J., Hroncová, E., Ladomerský, J., & Balco, K. (2017). Environmental evaluation of grey cast iron via life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 148, 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.023>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), 1006–1012. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.005>
- Montanuniversität Leoben (EVT). (2023). *Energieinfrastruktur 2040: Szenarien und Ausbaupläne für ein nachhaltiges Wirtschaftssystem in Österreich*.
- Monteleone, B., Baldereschi, E., Fabbri, N., De Bernardi, C., & Frey, M. (2024). A sustainability assessment of the foundry production process in Italy. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 491–501. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.005>
- Müller, A. (2018). *Baustoffrecycling: Entstehung - Aufbereitung - Verwertung*. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22988-7>
- Nagle, A. J., Mullally, G., Leahy, P. G., & Dunphy, N. P. (2022). Life cycle assessment of the use of decommissioned wind blades in second life applications. *Journal of Environmental Management*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113994>
- Oberoi, I. S., Rajkumar, P., & Das, S. (2021). Disposal and recycling of plastics. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7875–7880. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.562>
- OECD. (2020a). *Labour market consequences of a transition to a circular economy: A review paper* (OECD Environment Working Papers 162). OECD Publishing. https://www.oecd-ilibrary.org/environment/labour-market-consequences-of-a-transition-to-a-circular-economy_e57a300a-en
- OECD. (2020b). *The jobs potential of a transition towards a resource efficient and circular economy* (OECD Environment Working Papers 167; OECD Environment Working Papers, Bd. 167). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/28e768df-en>
- Omodara, L., Saavalainen, P., Pitkäaho, S., Pongrácz, E., & Keiski, R. L. (2023). Sustainability assessment of products—Case study of wind turbine generator types. *Environmental Impact Assessment Review*, 98, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106943>
- Owsianiak, M., Bjørn, A., Laurent, A., Molin, C., & Ryberg, M. W. (2018). LCA Applications. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Hrsg.), *Life cycle Assessment: Theory and Practice* (S. 31–41). Springer.
- Ozsahin, B., Elginöz, N., & Germirli Babuna, F. (2022). Life cycle assessment of a wind farm in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(47), 71000–71013. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20783-0>
- Pego, A. C. (2019). The Portuguese Offshore Energy SWOT Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1222, 012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1222/1/012036>

- Pender, K., Romoli, F., & Fuller, J. (2024). Lifecycle Assessment of Strategies for Decarbonising Wind Blade Recycling toward Net Zero 2050 †. *Energies*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/en17123008>
- Pillain, B., Loubet, P., Pestalozzi, F., Woidasky, J., Erriguible, A., Aymonier, C., & Sonnemann, G. (2019). Positioning supercritical solvolysis among innovative recycling and current waste management scenarios for carbon fiber reinforced plastics thanks to comparative life cycle assessment. *Journal of Supercritical Fluids*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104607>
- Pincelli, I. P., Hinkley, J., & Brent, A. (2024). Developing onshore wind farms in Aotearoa New Zealand: Carbon and energy footprints. *Journal of the Royal Society of New Zealand*. <https://doi.org/10.1080/03036758.2024.2344785>
- Portillo, F., Alcayde, A., Garcia, R. M., Fernandez-Ros, M., Gazquez, J. A., & Novas, N. (2024). Life Cycle Assessment in Renewable Energy: Solar and Wind Perspectives. In *Environments—MDPI* (Bd. 11, Nummer 7). <https://doi.org/10.3390/environments11070147>
- Potting, J., Hekkert, M., Worell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain* (S. 46). PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Recycling Magazin. (2021). *Eurecum zerschneidet Rotorblätter*. <https://www.recyclingmagazin.de/2021/01/12/eurecum-zerschneidet-rotorblaetter>, Abrufdatum: 11.08.2025
- Renk, A., & Waalkes, F. (2024). *EPD of a Nordex wind farm with Delta4000 N149/5.X turbines LCA Report*. Nordex.
- Röck, V., Thuneke, K., Ettl, J., Emberger, P., & Remmele, E. (2023). *HVO-Diesel für Traktoren – Analyse zum Einsatz des paraffinischen Dieselkraftstoffs HVO auf Staatsbetrieben*. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ).
- Rosenbaum, R. K., Georgiadis, S., & Fantke, P. (Hrsg.). (2018). Uncertainty Management and Sensitivity Analysis. In *Life cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer.
- RouteScanner. (2024). *RouteScanner*. <https://www.routescanner.com>, Abrufdatum: 10.12.2024
- Ruge, J., & Wohlfahrt, H. (2013). *Technologie der Werkstoffe: Herstellung, Verarbeitung, Einsatz* (9., überarb. u. akt. Aufl. 2013). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01881-8>
- Scherhauser, S., Part, F., & Beigl, P. (2021). Das Sekundärressourcenpotenzial aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 73(1–2), 36–48. <https://doi.org/10.1007/s00506-020-00723-3>
- Schweizer Bundesamt für Energie. (2015). *Ökobilanzierung von Schweizer Windenergie*.
- Sheng, S. (2013). *Report on Wind Turbine Subsystem Reliability—A Survey of Various Databases (Presentation)*.
- Shi, S., & Yan, X. (2024). A critical review on spatially explicit life cycle assessment methodologies and applications. *Sustainable Production and Consumption*, 52, 566–579. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.015>

- Sobaszek, Ł., Piasecka, I., Flizikowski, J., Tomporowski, A., Sokolovskij, E., & Bałdowska-Witos, P. (2023). Environmentally Oriented Analysis of Benefits and Expenditures in the Life Cycle of a Wind Power Plant. *Materials*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/ma16020538>
- Sommer, V., Becker, T., & Walther, G. (2022). Steering Sustainable End-of-Life Treatment of Glass and Carbon Fiber Reinforced Plastics Waste from Rotor Blades of Wind Power Plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106077>
- Spini, F., & Bettini, P. (2024). End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies. *Composites Part B: Engineering*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111290>
- Sproul, E., Williams, M., Rencheck, M. L., Korey, M., & Ennis, B. L. (2023). Life cycle assessment of wind turbine blade recycling approaches in the United States. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1293(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1293/1/012027>
- Steinacker, S., Rumpold, R., & Antrekowitsch, J. (2015). Behandlung und Verwertung der Reststoffe aus der Kupfer-Metallurgie. In *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2* (S. 545–559). TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.
- Steubing, B., de Koning, D., Haas, A., & Mutel, C. L. (2020). The Activity Browser—An open source LCA software building on top of the brightway framework. *Software Impacts*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2019.100012>
- The Wind Power. (2025). *Austrian wind farms database*. https://www.thewindpower.net/country_en_13_austria.php, Abrufdatum: 25.03.2025.
- Thibaut, F., & Hache, E. (2024). *Cumulative Energy Demand and Global Warming Potential of Metals and Minerals Production: Assessment, Projections and Mitigation Options*.
- Tota-Maharaj, K., & McMahon, A. (2021). Resource and waste quantification scenarios for wind turbine decommissioning in the United Kingdom. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 3(2), 117–144. <https://doi.org/10.1007/s42768-020-00057-6>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Umweltbundesamt. (2024). *Austria's National Inventory Report 2024*.
- Velenturf, A. P. M. (2021). A Framework and Baseline for the Integration of a Sustainable Circular Economy in Offshore Wind. *Energies*, 14(17), 5540. <https://doi.org/10.3390/en14175540>
- Vestas Wind Systems A/S. (2009). *Brochure Vestas V90-1.8/2.0 MW*.
- Vestas Wind Systems A/S. (2010). *General Specification V100–1.8 MW 50 Hz VCS*.
- Vestas Wind Systems A/S. (2011, September). *2 MW: V80-2.0 MW, V90-1.8/2.0 MW, V100-1.8 MW*.
- Vestas Wind Systems A/S. (2020). *Vestas Rotor Upgrade*.
- Vo Dong, P. A., Azzaro-Pantel, C., & Cadene, A.-L. (2018). Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste

- management. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.024>
- Wien Energie. (2023, Juni 6). *Windradteile des Windparks Trumau: Materialien & Herkunft*. Wien Energie. <https://www.wienenergie.at/blog/wo-und-wie-kommen-die-teile-fur-ein-windrad-her/>, Abrufdatum: 17.08.2025
- Windkraft Simonsfeld AG. (2012). *Geschäftsbericht*.
- Xicotencatl, B. M., Kleijn, R., Van Nielen, S., Donati, F., Sprecher, B., & Tukker, A. (2023). Data implementation matters: Effect of software choice and LCI database evolution on a comparative LCA study of permanent magnets. *Journal of Industrial Ecology*, 27(5), 1252–1265. <https://doi.org/10.1111/jiec.13410>
- Zhang, W., Yu, H., Yin, B., Akbar, A., & Liew, K. M. (2023). Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling. *Journal of Cleaner Production*, 426, 139184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139184>

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Grundsätze der Kreislaufwirtschaft in Österreich (R-Grundsätze) (BMK, 2022, S. 15).....	11
Abbildung 2.2: Windkraftleistung in Österreich bis 2023 mit Prognose für 2024 (IG Windkraft, 2025)	13
Abbildung 2.3: Aufbau und Zusammensetzung moderner Windkraftanlagen (Scherhauber et al., 2021).....	16
Abbildung 2.4: Übliche Zusammensetzung von Windkraftanlagen nach Systemkomponenten und Materialien (Scherhauber et al., 2021).....	16
Abbildung 2.5: Zusammensetzung der Vestas V90-2MW Windkraftanlage nach Systemkomponenten und Materialien (Garrett & Rønde, 2011).....	17
Abbildung 3.1: Vorgehensweise bei der Literaturanalyse dieser Diplomarbeit (Hinde & Spackman, 2015; Tranfield et al., 2003).....	23
Abbildung 3.2: Flussdiagramm der systematischen Literaturrecherche in Anlehnung an das PRISMA-Statement (Moher et al., 2009)	26
Abbildung 3.3: Flussdiagramm des Forward und Backward Reference Searching in Anlehnung an das PRISMA-Statement (Moher et al., 2009)	27
Abbildung 3.4: Jährliche Anzahl an Publikationen der Keyword-Suche in Scopus... ..	28
Abbildung 3.5: Verteilung der Publikationen nach Herkunftsland der Keyword-Suche in Scopus.....	28
Abbildung 3.6: Publikationen nach Zeitschriften der Keyword-Suche in Scopus	29
Abbildung 3.7: Häufigste Keywords in den Publikationen der Keyword-Suche in Scopus.....	29
Abbildung 4.1: Phasen der Lebenszyklusanalyse laut ISO 14040 (ISO, 2006a)	51
Abbildung 5.1: Relative Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien für das Fundament einer Vestas V90 Windkraftanlage (normalisiert auf -100 % = günstigstes Szenario)	81
Abbildung 5.2: Relative Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien für den Turm einer Vestas V90 Windkraftanlage (normalisiert auf -100 % = günstigstes Szenario)	82
Abbildung 5.3: Relative Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien für die Gondel einer Vestas V90 Windkraftanlage (normalisiert auf -100 % = günstigstes Szenario)	82
Abbildung 5.4: Relative Umweltauswirkungen verschiedener EoL-Strategien für den Rotor einer Vestas V90 Windkraftanlage (normalisiert auf -100 % = günstigstes Szenario)	82
Abbildung 5.5: Sensitivitätsanalyse – Veränderung des GWP in allen Szenarien der verlängerten Lebensdauer (Lebensdauererweiterung, Reuse, Repower)	88
Abbildung 5.6: Sensitivitätsanalyse – Veränderung des GWP in allen Szenarien der Materialverwertung (Repurpose, Recycle, Recover)	88

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Stromerzeugung nach Energieträgern für ausgewählte Jahre nach Energiebilanz und Netzinfrasturkturplan-Szenarien (BMK, 2024b; Montanuniversität Leoben (EVT), 2023)	14
Tabelle 2.2: Überblick der EoL-Optionen und deren Stand der Technik für Systemkomponenten von WKA	20
Tabelle 3.1: Keywords, zugehörige Synonyme und ähnliche Suchbegriffe der Literaturanalyse	24
Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der in der Literaturanalyse inkludierten LCA-Studien	32
Tabelle 5.1: Durch Kombinationen aus Komponenten und Strategien definierte EoL-Szenarien der V90	57
Tabelle 5.2: Materialzusammensetzung der Vestas V90-2MW Windkraftanlage auf Ebene der Systemkomponenten (Deutsches Umweltbundesamt, 2022; Garrett & Rønde, 2011; Schweizer Bundesamt für Energie, 2015; Sobaszek et al., 2023; Vestas Wind Systems A/S, 2009, 2011).....	59
Tabelle 5.3: Farbcode für die Verwendung verschiedener Parameter in den Vorberechnungen des LCI.....	60
Tabelle 5.4: Jährliche Ausfallraten wichtiger Windkraft-Komponenten	65
Tabelle 5.5: LCIA aller betrachteten Szenarien in den vier Einflusskategorien.....	81
Tabelle 5.6: LCIA-Ergebnisse und Daten der Sensitivitätsanalyse für Reuse des Turms (Szenario 2.2)	87
Tabelle 5.7 Gemeinsamkeiten der verschiedenen Szenarien und betroffene Prozesse	92
Tabelle 5.8 Anzahl der Prozesse in den Szenarien vor und nach Anwendung des Cut-off-Kriteriums von 1 %	95
Tabelle 5.9: Vergleich der LCIA-Ergebnisse der simplifizierten Methode mit den vollständigen LCIA-Ergebnissen nach Beträgen	96
Tabelle 7.1: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der Lebensdauererweiterung des Fundaments (Szenario 1.1) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024).....	110
Tabelle 7.2: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der Lebensdauererweiterung des Turms (Szenario 1.2) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024).....	110
Tabelle 7.3: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der Lebensdauererweiterung der Gondel (Szenario 1.3) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024).....	110
Tabelle 7.4: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der Lebensdauererweiterung des Rotors (Szenario 1.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024).....	112

Tabelle 7.5: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei Reuse des Turms (Szenario 2.2) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	114
Tabelle 7.6: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei Reuse der Gondel (Szenario 2.3) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	115
Tabelle 7.7: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei Reuse des Rotors (Szenario 2.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	116
Tabelle 7.8: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der beim Repowering des Fundaments (Szenario 3.1) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	119
Tabelle 7.9: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der beim Repowering des Turms (Szenario 3.2) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	119
Tabelle 7.10: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse bei der beim Repowering der Gondel (Szenario 3.3) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	119
Tabelle 7.11: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Repowering des Rotors (Szenario 3.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	121
Tabelle 7.12: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Repurposing des Rotors (Szenario 4.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	123
Tabelle 7.13: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recycling des Fundaments (Szenario 5.1) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	124
Tabelle 7.14: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recycling des Turms (Szenario 5.2) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	125
Tabelle 7.15: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recycling der Gondel (Szenario 5.3) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	125
Tabelle 7.16: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recycling des Rotors (Szenario 5.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	127
Tabelle 7.17: Aktivitäten und zugewiesene ecoinvent-Prozesse beim Recovery des Rotors (Szenario 6.4) einer Vestas V90-2MW Windkraftanlage (ecoinvent Association, 2024)	128
Tabelle 7.18: Ergebnisse des Lifecycle Impact Assessments (LCIA) und Daten der Sensitivitätsanalyse	139

Tabelle 7.19: Sensitivitätsanalyse – Auswirkung der Variation der Verlängerung der Lebensdauer um +50 % auf die LCIA-Ergebnisse.....	148
Tabelle 7.20: Sensitivitätsanalyse – Auswirkung der Variation der Austauschrate ausgefallener Komponenten um +20 % auf die LCIA-Ergebnisse.....	149
Tabelle 7.21: Sensitivitätsanalyse - Auswirkung der Variation der Transportdistanzen um +50 % auf die LCIA-Ergebnisse.....	149
Tabelle 7.22: Sensitivitätsanalyse- Auswirkung der Variation der Montageaufwände um +50 % auf die LCIA-Ergebnisse.....	150
Tabelle 7.23: Sensitivitätsanalyse – Auswirkung der Variation der Effizienz bei der Materialverwertung um +20% auf die LCIA-Ergebnisse	150
Tabelle 7.24: Simplifizierung der Lebenszyklusanalysen der zirkulären EoL-Strategien der Vestas V90-2MW Windkraftanlage.....	151

11 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
%	Prozent(e)
‰	Promille
AP	Acidification Potential (Säuerungspotenzial)
AP	Acidification Potential
Äq	Äquivalent(e) (z. B. CO ₂ -Äq.)
AT	Österreich
BCSC	Bidirectional Citation Searching to Completion
BDSV	Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen
BGLD	Burgenland
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BML	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft
BREF	Best Available Techniques Reference Document (Beste-Verfügbare-Techniken-Merkblatt)
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CaO	Calciumoxid
CE	Circular Economy (Kreislaufwirtschaft)
CED	Comulative Energy Demand
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DE	Deutschland
DK	Dänemark
EFQM	European Foundation for Quality Management
EK	Europäische Kommission
EoL	End-of-Life
EP	Eutrophication Potential (Eutrophierungspotenzial)
EPD	Environmental Product Declaration
ES	Spanien
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EuRIC AISBL	European Recycling Industries' Confederation Association Internationale sans but lucratif (Belgische non-Profit Organisation)

EVT	Lehrstuhl für Energieverbundtechnik an der Montanuniversität Leoben
FBRs	Forward and Backward Reference Searching
GB	Großbritannien
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoff(e)
GJ	Gigajoule
GWEC	Global Wind Energy Council
GWP	Global Warming Potential (Klimaerwärmungs-Potential)
h	Stunde(n)
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde(n)
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
LCI	Life Cycle Inventory (Bestandsanalyse)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Folgenabschätzung)
Lkw	Lastkraftwagen
lt.	laut
max.	maximal(e)
Mio.	Million(en)
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde(n)
niedr.	niedrig
ODP	Ozone Layer Depletion Potential
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PE	Polyethylen
Pkw	Personenkraftwagen
PO ₄	Phosphat
POF	Photochemical Oxidant Formation (Photochemische Oxidationsmittelbildung)
PP	Polypropylen

PVC	Polyvinylchlorid
SLR	Systematic Literature Review - Systematische Literaturanalyse
SO ₂	Siliziumdioxid
spez.	spezifisch(e)
STMK	Steiermark
THG	Treibhausgas(e)
TRL	Technology Readiness Level (Technologischer Reifegrad)
TWh	Terawattstunde(n)
u. a.	unter anderem
u./o.Ä.	und/oder Ähnliche/s
U/min	Umdrehungen pro Minute
USA	United States of America (Vereinigte Staaten von Amerika)
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

12 Verwendete KI-Tools

KI-Tool	Verwendungszweck
ChatGPT Model 4 & 5	• Erstellen von Gliederungen und Strukturen • Stilistische Aufbereitung des Textes zur besseren Lesbarkeit • Identifikation von Literatur
DeepL	• Übersetzung englischsprachiger Passagen ins Deutsche • Übersetzung deutschsprachiger Passagen ins Englische
Duden-Mentor	• Prüfung der Grammatik und Rechtschreibung