



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science (Dipl. Ing.)

unter der Leitung von

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

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

Dipl.-Ing.in Stefanie Eisl

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Industrial Engineering)

eingereicht an der TU Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Felix Gauss

11713096

Wien, im September 2024

Felix Gauss



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre hiermit 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, im September 2024

Felix Gauss

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinen Eltern danken, welche mir dieses Studium ermöglicht haben. Besonders für die kontinuierliche Unterstützung, die stetige Motivation sowie das uneingeschränkte Vertrauen und Verständnis. Außerdem möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die immer hinter mir stand und zu jedem Zeitpunkt an mich geglaubt hat.

Zusätzlich möchte ich mich bei meinem Hauptbetreuer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund und dem Institut für Managementwissenschaften für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit verfassen zu können, bedanken. Insbesondere auch bei meiner organisatorischen Betreuerin Dipl.-Ing.in Stefanie Eisl für die Freiheiten in der Erarbeitung dieser Diplomarbeit sowie der kompetenten, engmaschigen und außerordentlich hilfreichen Betreuung. Ich hätte mir die Betreuung nicht besser wünschen können!

Ein riesiges Dankeschön geht zudem an alle Wegbegleiter und Wegbegleiterinnen in Wien, die ich während meiner Studienzeit kennenlernen durfte. Ganz besonders jedoch an Bardia und Philipp, mit denen ich eine der prägendsten Zeiten meines Lebens verbringen durfte. Aus Freunden und Freundinnen wurde eine zweite Familie, die mich in den leichtesten und ebenfalls schwersten Zeiten begleitete. Ohne diese Menschen, dem Phänomen der BGB und dem medizinischen Hintergrund würde ich niemals so erfüllt auf meine Studienzeit zurückblicken können.

Danke!

Kurzfassung

Mit dem hohen Gesamtvolumen der globalen Wirtschaftstätigkeit und dem hohen globalen Energie- und Ressourcenverbrauch gehen Probleme wie der Klimawandel und der Verlust der biologischen Vielfalt einher. Eine lineare Nutzung von Ressourcen verstärkt zusätzlich die Problematik der Ressourcenverknappung. Sehr massereiche Systeme wie Windkraftanlagen (WKA) sind besonders betroffen. Ein Lösungsansatz, den Ressourcenverlust und -verbrauch zu verringern, ist die Kreislaufwirtschaft und die Anwendung von End-of-Life (EoL) Optionen. Ein zentrales Problem entsteht bei der Auswahl einer geeigneten EoL Option, da diese von einer Vielzahl von Entscheidungsfaktoren abhängen. Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von EoL Optionen an WKA. Durch dieses Modell sollen unterschiedliche EoL Optionen, welche sich auf Komponenten und Materialien von WKA beziehen, anhand ihrer ökologischen Umweltauswirkungen umfänglich und transparent evaluiert und verglichen werden. Das entwickelte Modell soll potenziellen Entscheidungsträgern als Entscheidungshilfe dienen, um die Produktions- und Verbrauchsentscheidungen in eine umweltfreundlichere Richtung zu lenken. Der Vorteil einer Bepreisung besteht darin, dass ökologische Umweltauswirkungen in einem standardisierten Geldwert ausgedrückt werden, wodurch diese instinktiv leichter zu verstehen sind. Die Basis dieser Arbeit stellt eine systematische Literaturrecherche (SLR) mit 4 Suchschwerpunkten in 3 Datenbanken dar. Aus einer Anzahl von 5.082 angezeigten Treffern wurden 85 relevante Literaturen identifiziert, welche mit Hilfe eines Bewertungssystems nach 6 Kategorien qualitativ bewertet wurden. Zusätzlich zur SLR wurde die Backward-and-Forward (BaF) Methode verwendet, wodurch weitere relevante Literaturen zur Beantwortung der Forschungsfragen identifiziert wurden. Mit Hilfe der Methode des Experteninterviews wurde die abschließende Evaluierung der Forschungsarbeit durchgeführt. Insgesamt wurden 4 Interviews mit Experten der Fachgebiete Energieerzeugung mittels WKA, Herstellung von WKA, Kreislaufwirtschaft und Finanzwirtschaft abgehalten. Das Ergebnis dieser Arbeit ist die Identifizierung der Ecocost / Value Ratio (EVR) Bepreisungsmethode, welche sich aus einer Menge von betrachteten Bepreisungsmethoden am besten zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von EoL Optionen an WKA anwenden lässt. Die EVR Bepreisungsmethode wurde anhand eines zuvor definierten Use Case und 6 entwickelten Vergleichskriterien ausgewählt. Der Use Case bezieht sich auf Modell- und Hersteller-unspezifische On-Shore WKA, welche in Österreich errichtet wurden und nun einer Stilllegung unterzogen werden. Die qualitative Vorgehensweise dieser Forschungsarbeit, die Qualität der durchgeführten SLR sowie die Ergebnisse wurden abschließend durch die Experteninterviews validiert.

Abstract

The high total volume of global economic activity and the high global consumption of energy and resources are accompanied by problems such as climate change and the loss of biodiversity. The linear use of resources also intensifies the problem of resource scarcity. Very high-mass systems such as wind turbines are particularly affected. One approach to reducing resource loss and consumption is the circular economy and the use of end-of-life (EoL) options. A central problem arises when selecting a suitable EoL option, as this depends on a large number of decision factors. The main objective of this thesis is to develop a model for pricing the environmental impact of EoL options on wind turbines. This model is intended to evaluate and compare different EoL options which relate to components and materials of wind turbines based on their ecological environmental impact comprehensively and transparently. The model developed is intended to serve as a decision-making aid for potential decision-makers to steer production and consumption decisions in a more environmentally friendly direction. The advantage of pricing is that ecological environmental impacts are expressed in a standardized monetary value, making them instinctively easier to understand. The basis of this work is a systematic literature review (SLR) with 4 search foci in 3 databases. From a total of 5.082 hits, 85 relevant literatures were identified, which were qualitatively evaluated according to 6 categories using a rating system. In addition to the SLR, the backward-and-forward (BaF) method was used to identify further relevant literature to answer the research questions. The final evaluation of the research work was carried out using the expert interview method. A total of 4 interviews were held with experts in the fields of energy generation using wind turbines, wind turbine production, circular economy and finance. The result of this work is the identification of the Ecocost / Value Ratio (EVR) pricing method. It can be best applied from a set of considered pricing methods to price the environmental impact of EoL options on wind turbines. This was selected based on a previously defined use case and 6 developed comparison criteria. The use case refers to model- and manufacturer-unspecific onshore wind turbines that were erected in Austria and are now being decommissioned. The qualitative approach of this research work, the quality of the SLR carried out and the results were finally validated by the expert interviews.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.2	Forschungsfragen und Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Aufbau und Struktur der Arbeit.....	3
2	Theoretische Grundlagen.....	5
2.1	Grundlagen der Kreislaufwirtschaft.....	5
2.1.1	Von der Linearwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft.....	5
2.1.2	Die Kreislaufwirtschaft.....	7
2.1.3	End-of-Life Optionen.....	8
2.2	Grundlagen Umweltauswirkungen.....	11
2.3	Grundlagen Bepreisung.....	13
2.3.1	Bepreisung von ökologischen Umweltauswirkungen.....	14
2.4	Grundlagen Windkraftanlage.....	16
3	Aktueller Stand der Forschung.....	20
3.1	Systematische Literaturrecherche.....	20
3.1.1	Methodik der systematischen Literaturrecherche.....	20
3.1.2	Definition der Rahmenbedingungen der fünf Phasen.....	24
3.1.3	Durchführung der systematischen Literaturrecherche.....	30
3.1.4	Fazit und Ergebnis der systematischen Literaturrecherche.....	32
3.2	Ergebnis der systematischen Literaturrecherche bezogen auf die Subforschungsfragen.....	37
3.2.1	Beantwortung der Subforschungsfrage FF1.....	37
3.2.2	Beantwortung der Subforschungsfrage FF2.....	41
3.2.3	Beantwortung der Subforschungsfrage FF3.....	46
4	Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen.....	59
4.1	Vergleich der Bepreisungsmethoden und Wirkungskategorien der SLR.....	59
4.2	Vergleich der Wirkungskategorien der Literaturquellen mit Windkraftanlagen Bezug.....	63
4.3	Vor- und Nachteile der identifizierten Bepreisungsmethoden in Bezug auf den Use Case Windkraftanlage.....	66

4.4	Auswahl einer Bepreisungsmethode für den Use Case Windkraftanlage	73
5	Anwendung der Bepreisungsmethode EVR am Use Case Windkraftanlage	75
6	Evaluierung der Forschungsarbeit mittels Experteninterviews	82
6.1	Methodik und Durchführung der Experteninterviews	82
6.2	Ergebnisse der Experteninterviews	85
7	Diskussion und Ausblick	89
7.1	Diskussion der Ergebnisse	89
7.2	Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse	91
7.3	Ausblick	92
8	Literaturverzeichnis	94
9	Abbildungsverzeichnis	102
10	Formelverzeichnis	103
11	Tabellenverzeichnis	104
12	Abkürzungsverzeichnis	105
13	Anhang	107

1 Einleitung

Mit einem Massen-Leistungs-Verhältnis von ungefähr 500 Tonnen pro Megawatt enthalten Windkraftanlagen (WKA) große Mengen an Materialien und Rohstoffe (Scherhauser et al., 2020, S. 42). Allein in Österreich erzeugten Ende 2023 1.426 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 3.885 Megawatt nachhaltigen Strom. Der stetige Zuwachs der Windkraftleistung in Österreich seit Anfang der 2000er Jahre führt, auf Grund der durchschnittlichen Nutzungsdauer einer WKA von 20 Jahren, in den kommenden Jahren zu einem starken Anstieg an Komponenten und Materialien, welche das Ende ihrer Nutzungsphase erreichen (Andersen et al., 2016, S. 1; IG Windkraft, 2024a). Die Herausforderungen der nachhaltigen Handhabung dieser enormen Mengen an Ressourcen gilt es zu bewältigen, um ökologische Umweltauswirkungen zu reduzieren und europäische wie nationale Klimaziele zu erreichen.

In weiterer Folge wird auf die Ausgangssituation und Problemstellung, die Forschungsfrage und Ziel der Arbeit sowie den Aufbau und Struktur der Arbeit eingegangen.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Mit dem hohen Gesamtvolumen der globalen Wirtschaftstätigkeit und dem hohen globalen Energie- und Ressourcenverbrauch gehen Probleme wie der Klimawandel und der Verlust der biologischen Vielfalt einher (Giljum et al., 2008, S. 205). Da gewisse Rohstoffe, wie beispielsweise Kupfer oder Aluminium, in ihrem Vorkommen begrenzt sind, kann bei einer Verbesserung der weltweiten Lebensstandards für diese Rohstoffe eine Rohstoffverknappung entstehen (Moriarty & Honnery, 2010, S. 47). Besonders betroffen sind die sehr massereichen Bauteile einer Windkraftanlage (WKA), welche unter anderem aus Stahl, Kupfer oder Aluminium bestehen (Scherhauser et al., 2020, S. 42-43).

Betrachtet man die produzierende Industrie und den nachfolgenden Verbraucher der letzten Jahrzehnte, so lässt sich eine Linearwirtschaft erkennen. Produkte werden oft nur wenige Male verwendet und schon nach einem geringen Verlust der Funktionsfähigkeit entsorgt (Herrmann & Vetter, 2021, S. 16).

Lösungsansätze, den Ressourcenverbrauch zu verringern, verwenden End-of-Life (EoL) Optionen, wie beispielsweise Recycling, Repair oder Remanufacture, um nicht verwendete Ressourcen und Abfall zu reduzieren. Der Großteil eines Produkts wird somit am Ende seines Lebenszyklus (EoL) wieder in den Kreislauf der Wirtschaft eingeführt, was dem Grundgedanken der Kreislaufwirtschaft entspricht (Herrmann & Vetter, 2021, S. 17).

Ein zentrales Problem entsteht nun bei der Auswahl einer geeigneten EoL Option, da diese von einer Vielzahl von Entscheidungsfaktoren abhängt. So bedarf es beispielsweise im Produktrecycling der Bestimmung einer EoL Option, welche die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen minimiert (Bakar & Rahimifard, 2008, S. 265). Ebenfalls steigt durch die Einführung neuer Rechtsvorschriften die Notwendigkeit, Kosten und Umweltnutzen von Produkten und Materialien zu bewerten (Bakar & Rahimifard, 2008, S. 261).

Neben den eben genannten Problemen entwickelte sich seit Anfang der 90er Jahre die Notwendigkeit, die Umwelt bei der Formulierung von Politiken und der Entwicklung spezifischer Maßnahmen zur Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels, der Umweltverschmutzung und der Ressourcenbewirtschaftung zu berücksichtigen (Remeur, 2020, S. 2). Unterschiedliche Methoden wie beispielsweise die Umweltbesteuerung, welche Umweltschäden oder negative externe Effekte in die Preise einbezieht, werden genutzt um die Produktions- und Verbrauchsentscheidungen in eine umweltfreundlichere Richtung zu lenken (Remeur, 2020, S. 1). Der Vorteil einer solchen Bepreisung ist, dass die ökologischen Umweltauswirkungen in einem standardisierten Geldwert ausgedrückt werden, der instinktiv leicht zu verstehen ist (Vogtländer & Mestre, 2009, S. 3).

1.2 Forschungsfragen und Ziel der Arbeit

Auf Grund der in Kapitel 1.1 ‚Ausgangssituation und Problemstellung‘ beschriebenen Probleme besteht das Hauptziel dieser Arbeit in der Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von EoL Optionen an WKA.

Durch dieses Modell sollen unterschiedliche EoL Optionen, welche sich auf Bauteile, Komponenten oder das gesamte System von WKA beziehen, anhand ihrer ökologischen Umweltauswirkungen umfänglich und transparent evaluiert und verglichen werden. Das entwickelte Modell kann einem potenziellen Entscheidungsträger als Entscheidungshilfe dienen, da die ökologischen Umweltauswirkungen der EoL Optionen innerhalb der Modellgrenzen besser abgeschätzt werden können (Abdessalem et al., 2012, S. 156). Die Ergebnisse des Modells sind jedoch nicht direkt als ein realitätsgetreuer Entscheidungsbeschluss zu werten, da ein Modell stets eine vereinfachte Darstellung der Realität ist und für eine realitätsgetreue Entscheidung wichtige Einflussfaktoren vernachlässigen kann.

Um die Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusätzlich zu validieren, soll dies mit Hilfe der Methode des Experteninterviews durchgeführt werden. Ziel des Experteninterviews ist es, Zugang zu Informationen zu erlangen, welche öffentlich nicht oder nur sehr begrenzt verfügbar sind, womit sich einem bis dahin weitgehend unerforschten Feld angenähert werden kann. Ebenfalls zielt die Methode auf das Wissen der Befragten und nicht auf ihre persönlichen Ansichten ab

(Wagemann et al., 2020, S. 268). Anhand der erlangten Informationen soll anschließend eine Evaluierung dieser Forschungsarbeit durchgeführt werden.

Aus den eben definierten Zielen dieser Arbeit ergibt sich folgende Hauptforschungsfrage: **„Wie kann ein Modell zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen entwickelt werden?“**

Aus der Hauptforschungsfrage resultieren folgende Subforschungsfragen (FFx):

- FF1: **„Was ist der aktuelle Stand der Forschung und Technik bezüglich realisierbarer End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen?“**
- FF2: **„Was ist der aktuelle Stand der Forschung bezüglich möglicher Bepreisungsmethoden der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen?“**
- FF3: **„Welche Eigenschaften besitzen die in FF2 identifizierten Bepreisungsmethoden und wie umfänglich sind diese?“**

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Zur Beantwortung der in Kapitel 1.2 ‚Forschungsfragen und Ziel der Arbeit‘ definierten Haupt- und Subforschungsfragen wird diese Arbeit wie folgt strukturiert.

Zu Beginn werden in Kapitel 2 ‚Theoretische Grundlagen‘ die theoretischen Grundlagen erläutert, welche für das bessere Verständnis dieser Arbeit benötigt werden. Die Entwicklung von der Linearwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft, sowie die Definition von EoL Optionen ist Kern des ersten Teils des Kapitels. Im zweiten Teil des Kapitels wird auf die Umwelt selbst und ökologische Umweltauswirkungen eingegangen. Im dritten Teil des Kapitels werden die Grundlagen der Bepreisung von ökologischen Umweltauswirkungen erläutert. Im letzten Teil des Kapitels werden die Grundlagen einer Windkraftanlage dargestellt.

Anschließend wird in Kapitel 3 ‚Aktueller Stand der Forschung‘ die Vorgehensweise der in dieser Arbeit verwendeten Systematischen Literaturrecherche (SLR) vorgestellt. Nachdem die Durchführung, das Ergebnis und das Fazit der durchgeführten SLR erläutert wurden, werden die gestellten Subforschungsfragen, sowie der aktuelle Stand der Forschung, anhand der Resultate der SLR beantwortet und beschrieben.

Nachfolgend werden in Kapitel 4 ‚Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen‘ die aus der SLR identifizierten Bepreisungsmethoden miteinander verglichen und deren Vor- und Nachteile in Bezug auf den Use Case Windkraftanlage identifiziert. Die Auswahl einer

Bepreisungsmethode, welche für den Use Case Windkraftanlage am besten geeignet ist, schließt dieses Kapitel ab.

Im Anschluss wird in Kapitel 5 ‚Anwendung der Bepreisungsmethode EVR am Use Case Windkraftanlage‘ die Anwendung der geeignetsten Bepreisungsmethode vorgestellt und mit Hilfe eines praktischen Beispiels, sowie expliziten Werten, verdeutlicht.

In Kapitel 6 ‚Evaluierung der Forschungsarbeit mittels Experteninterviews‘ werden die zur Evaluierung dieser Arbeit durchgeführten Experteninterviews erläutert, wobei auf die Entwicklung des Interviewfragebogens, die Auswahl der Experten, die Durchführung der Interviews sowie auf die Ergebnisse eingegangen wird.

Abschließend werden in Kapitel 7 ‚Diskussion und Ausblick‘ die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst dargestellt und diskutiert, auf Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse eingegangen, sowie mögliche Weiterentwicklungen dieser Arbeit genannt.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel wird in mehrere Grundlagenbereiche geteilt, wodurch die Übersichtlichkeit erhöht wird. Zu Beginn werden die theoretischen Grundlagen der Kreislaufwirtschaft erläutert, welche sich von der Linearwirtschaft bis hin zu den aktuellen EoL Optionen erstrecken. Folglich werden die Begriffe Umwelt sowie Umweltauswirkungen definiert und erläutert. Anschließend werden die theoretischen Grundlagen der Bepreisung sowie Methoden zur Bepreisung von ökologischen Umweltauswirkungen aus Literatur und Politik dargestellt. Abschließend werden die Grundlagen einer Windkraftanlage aufgeführt.

2.1 Grundlagen der Kreislaufwirtschaft

Um die theoretischen Grundlagen der Kreislaufwirtschaft systematisch zu erläutern, wird mit der Entwicklung von der Linearwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft begonnen. Anschließend wird der Kern dieses Grundlagenbereichs, die Kreislaufwirtschaft inklusive aktueller EoL Optionen, dargestellt.

2.1.1 Von der Linearwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft

Seit Mitte des 18ten Jahrhunderts begann sich das Konzept des linearen Fortschritts zu entwickeln. Durch die Anhäufung von Wohlstand, Wissen und Erfahrung verbesserte sich das menschliche Befinden für einen Großteil der Menschheit kontinuierlich (Bonciu, 2014, S. 79). Die geringe Weltbevölkerung und der zu diesem Zeitpunkt vorhandene technische Fortschritt waren der Grund für den, bis Anfang des 20ten Jahrhunderts, geringen verwendeten Anteil von verfügbaren Ressourcen und Flächen der Erde durch die gesamte Menschheit. Anfang des 20ten Jahrhunderts machte die globale Wirtschaft, im Vergleich zum globalen Ökosystem, nur einen kleinen Teil aus und die Idee der unlimitierten Produktion und das Modell der Linearwirtschaft blieben weiterhin bestehen (Bonciu, 2014, S. 79-80).

Das Modell der Linearwirtschaft beschreibt die Produktion und den Konsum von Waren (Bonciu, 2014, S. 88). Ressourcen werden aus der Umwelt gewonnen (Take), aus denen anschließend Produkte produziert und erzeugt werden (Make). Nach der Benutzung der Produkte und deren Funktionserfüllung werden diese als Abfall entsorgt (Dispose) (Herrmann & Vetter, 2021, S. 16). Zur Veranschaulichung des Modells der Linearwirtschaft dient Abbildung 1.



Abbildung 1: Modell der Linearwirtschaft angelehnt an Herrmann und Vetter (2021, S. 16)

In den 1970er Jahren wurden die Zweifel an der Zukunft der modernen Wirtschaft und Gesellschaft durch Berichte wie ‚*The Limits to Growth - A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*‘ von Meadows et al. (1972), welcher einen unbegrenzten linearen Anstieg der Produktion und des Wohlstandes in einer Welt mit begrenzten Ressourcen als nicht möglich beschreibt, ausgedrückt. Zusätzlich verstärkte die Ölpreiskrise Anfang der 1970er Jahre die eben genannten Zweifel, was direkt nach dieser Krise zu einer priorisierten Einsparung von Energie führte (Bonciu, 2014, S. 78-80).

Trotz der bekannten Umwelt- und Ressourcenprobleme wurden Verbesserungen der Energieeffizienz, der Energieeinsparung oder der Verringerung der Erzeugung von schädlichen Stoffen von Unternehmen und Regierungen nur sehr gering beachtet (Bonciu, 2014, S. 81).

Bereits im Jahr 2007 lag der totale ökologische Fußabdruck der Menschheit bei 18,0 Milliarden globalen Hektar. Jedoch waren in diesem Jahr nur 11,9 Milliarden globale Hektar an Ressourcenkapazität der Erde verfügbar. Somit lag der Ressourcenverbrauch zur Deckung des menschlichen Bedarfs im Jahr 2007 bei 150%, wofür eine Zeit von 1,5 Jahren zur Reproduktion der Ressourcen durch die Erde nötig wären (Ewing et al., 2010, S. 20).

Um den global steigenden Druck auf Ressourcen und Umwelt zu verringern, forderte die European Resource Efficiency Platform, in dem am 17. Dezember 2012 selbst veröffentlichten Manifest ‚*Manifesto For A Resource-Efficient Europe*‘ (Bruton et al., 2012), Unternehmen und Vertreter der Zivil- und Arbeitsgesellschaften auf, die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft und die Verbesserung der Ressourceneffizienz zu unterstützen. Ein weiteres Ziel dieser Aufforderung war das Vorantreiben einer Reindustrialisierung der europäischen Wirtschaft. Als Basis dieser Entwicklungen stand das nachhaltige und ressourceneffiziente Wachstum der europäischen Wirtschaft (Bruton et al., 2012, S. 1).

Durch das Modell der Kreislaufwirtschaft nehmen viele großen Unternehmen und Regierungen die aktuellen Herausforderungen der Umwelt und des Wirtschaftswachstums ernst. Viele Unternehmen und Regierungen setzen mit Hilfe des Modells der Kreislaufwirtschaft den Nachhaltigkeitsgedanken um, da das Modell dafür eine sehr gute Hilfestellung leistet (Crocker et al., 2018, S. 14).

2.1.2 Die Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft distanziert sich von dem linearen Fluss der Linearwirtschaft und dem Take-Make-Dispose Prinzip und nutzt einen kreislaufförmigen Fluss, der den vorhandenen Mehrwert der Produkte, so lange wie möglich, in der Kreislaufwirtschaft hält. Somit verbleiben auch die Ressourcen der Produkte, welche am Ende ihres Produktlebenszyklus stehen, in dem kreislaufförmigen Fluss und können wiederverwendet werden (Europäische Kommission, 2014, S. 2; Herrmann & Vetter, 2021, S. 16). Eine weitere Wertschöpfung der Ressourcen ist somit möglich, was hingegen in einer Linearwirtschaft durch das direkte Entsorgen der Produkte am Ende ihres Produktlebenszyklus nicht zu erreichen ist.

Der Bedarf an natürlichen Ressourcen, welche der Kreislaufwirtschaft zugeführt werden müssen, und die Menge an Abfall, die aus der Kreislaufwirtschaft abgeführt wird, ist im Vergleich zu einer Linearwirtschaft deutlich geringer – jedoch nie null. Grund dafür ist beispielsweise der Verlust an Mehrwert eines Produktes im Laufe seiner Nutzung, wodurch selbst eine stark ausgeprägte Kreislaufwirtschaft immer eine gewisse Linearität, und somit immer einen Bedarf nach neu hinzugefügten Ressourcen, beinhaltet (Europäische Kommission, 2014, S. 2).

Zur Veranschaulichung des Modells der Kreislaufwirtschaft dient Abbildung 2.

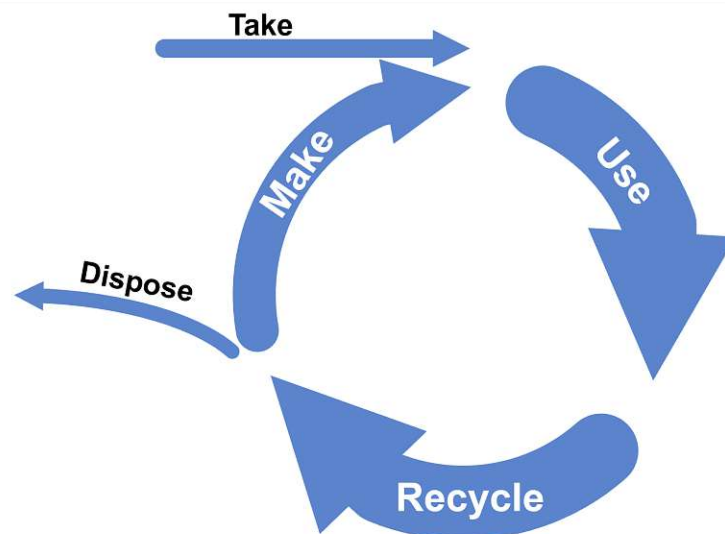


Abbildung 2: Modell der Kreislaufwirtschaft angelehnt an die Europäische Kommission (2014, S. 6); Herrmann und Vetter (2021, S. 17)

Nach dem von der Ellen MacArthur Foundation 2013 veröffentlichten Paper *‘Towards The Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition’*, basiert eine Kreislaufwirtschaft auf drei Prinzipien.

Das erste Prinzip ist der Kern der Kreislaufwirtschaft und setzt am Beginn des Produktlebenszyklus an. Durch nachhaltiges Design und Innovation werden Produkte für die Kreislaufwirtschaft und somit für die optimale Wiederverwendung entwickelt.

Ein einfacher Ausbau von Komponenten und die Kompatibilität zur Wiederverwendung liegen im Fokus (Ellen MacArthur Foundation, 2013, S. 7; Europäische Kommission, 2014, S. 5).

Das zweite Prinzip basiert auf der Kategorisierung der Komponenten eines Produkts. Alle Komponenten eines Produkts werden in zwei Kategorien, den konsumierbaren und dauerhaften Komponenten, eingeordnet. Konsumierbare Komponenten lassen sich in die Biosphäre rückführen, während dies bei dauerhaften Komponenten nur sehr schlecht, bis gar nicht möglich ist. Aus diesem Grund werden dauerhafte Komponenten bereits beim Design für die Wiederverwendung konzipiert (Ellen MacArthur Foundation, 2013, S. 7).

Das dritte Prinzip basiert auf der Verwendung von erneuerbaren Energien. Eine Deckung des Energiebedarfs der gesamten Kreislaufwirtschaft durch erneuerbare Energien senkt zum einen den Ausstoß schädlicher Stoffe in die Umwelt, sowie die Abhängigkeit von unsicheren Lieferquellen (Europäische Kommission, 2014, S. 3). Zusätzlich kommt es zu einer Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der gesamten Kreislaufwirtschaft gegenüber Verfügbarkeitschwankungen natürlicher Ressourcen (Ellen MacArthur Foundation, 2013, S. 7).

2.1.3 End-of-Life Optionen

End-of-Life (EoL) Optionen lassen sich als die Strategien, welche Produkte und deren Komponenten am Ende ihres Produktlebenszyklus in den Kreislauf der Wirtschaft rückführen, definieren. Wie bereits von Ma und Kremer (2014) erkannt, gibt es viele unterschiedliche Eingrenzungen von EoL Optionen. So definieren beispielsweise die neun untersuchten Literaturquellen zwischen drei und zehn EoL Optionen.

Um einen umfänglichen Überblick der möglichen EoL Optionen zu bieten, wird in diesem Kapitel das 9R-Rahmenkonzept, angelehnt an Kirchherr et al. (2017, S. 224) und Herrmann und Vetter (2021, S. 18) erläutert. Es ist das Grundkonzept, welches zur langfristigen Sicherheit der Gesellschaft beiträgt und wirtschaftliche, ökologische und soziale Vorteile mit sich bringt. Außerdem beinhaltet das 9R-Rahmenkonzept zehn EoL Optionen, welche von R0 (Refuse) bis R9 (Recover) definiert sind. Die Ziele des Grundkonzepts stehen mit denen der Kreislaufwirtschaft im Einklang (Herrmann & Vetter, 2021, S. 17).

Die verschiedenen EoL Optionen unterscheiden sich in ihrer wirtschaftlichen Zirkularität (van Buren et al., 2016, S. 3) und werden anhand dieses Kriteriums im 9R-Rahmenkonzept, geordnet. Je niedriger die Zahl der Beschreibung der Strategie, desto höher ist ihre wirtschaftliche Zirkularität. Im Gegenzug bedeutet dies, dass eine hohe Zahl der Beschreibung der Strategie im 9R-Rahmenkonzept eine niedrige wirtschaftliche Zirkularität dieser Strategie widerspiegelt (Potting et al., 2017, S. 15).

Abbildung 3 stellt das 9R-Rahmenkonzept, angelehnt an Kirchherr et al. (2017, S. 224) und Herrmann und Vetter (2021, S. 18), und die Anordnung der zehn EoL Optionen bezüglich ihrer wirtschaftlichen Zirkularität, dar.



Abbildung 3: 9R-Rahmenkonzept angelehnt an Herrmann und Vetter (2021, S. 18); Kirchherr et al. (2017, S. 224)

Die zehn EoL Optionen lassen sich in drei Gruppen aufteilen.

Intelligenterer Verwendung und Herstellung von Produkten

In den Optionen R0 (Refuse), R1 (Rethink) und (R2 Reduce) werden Informationen über den gesamten Produktlebenszyklus gesammelt, um neue Produkte im Bereich der Herstellung, der Produktnutzung und der Logistik effizienter und ressourcenschonender zu gestalten (Buchberger et al., 2019, S. 11; Herrmann & Vetter, 2021, S. 18-19).

R0 Refuse: Das Produkt wird nicht hergestellt, da es durch ein Alternativprodukt oder ein Produkt mit einer Alternativfunktion ersetzt wird (Potting et al., 2017, S. 5). Somit wird das Einführen von natürlichen Ressourcen in den Kreislauf verhindert, wodurch diese EoL Option die höchste wirtschaftliche Zirkularität aufweist (van Buren et al., 2016, S. 3).

R1 Rethink: Mit Hilfe dieser EoL Option wird der Bedarf, die Nutzung, die Nutzungsdauer und weitere kritische Fragen bezüglich des Produkts von dem Hersteller und auch dem Benutzer überdacht. Somit wird eine intensivere Nutzung und Ausschöpfung des Produkts erreicht (Buchberger et al., 2019, S. 12; Potting et al., 2017, S. 5).

R2 Reduce: Diese EoL Option verringert die Nutzung natürlicher Ressourcen (van Buren et al., 2016, S. 3). Durch die Verringerung der verwendeten natürlichen Ressourcen steigt die Effizienz der Produkterzeugung und Produktnutzung (Kirchherr et al., 2017, S. 224).

Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und deren Bauteile

Optionen R3 (Reuse) bis R7 (Repurpose) setzen sich mit der Verlängerung der Produktlebensdauer benutzter Produkte und deren Bauteile auseinander (Buchberger et al., 2019, S. 11; Herrmann & Vetter, 2021, S. 19).

R3 Reuse: Das Produkt besitzt noch seinen vollständigen Funktionsumfang und ist intakt. Es wird in einem neuen Produktnutzungszyklus von einem neuen Verbraucher benutzt, wodurch keine neuen Ressourcen verwendet werden müssen. Anforderungen an das Produkt, wie beispielsweise eine robuste und langlebige Ausführung der Bauteile, sind essenziell für diese EoL Option (Buchberger et al., 2019, S. 13; Kirchherr et al., 2017, S. 224).

R4 Repair: Ein vollständiger Funktionsumfang des Produktes ist nicht mehr gegeben. Durch eine Reparatur oder eine Wartung erhält das Produkt seinen ursprünglichen Funktionsumfang vollständig zurück, was dem Nutzer den Produktnutzungszyklus verlängert (Herrmann & Vetter, 2021, S. 18; Kirchherr et al., 2017, S. 224).

R5 Refurbish: Diese EoL Option überarbeitet ein nicht mehr aktuelles Produkt und stellt den Funktionsumfang eines neueren Produkts dieser Art her. Ebenfalls wird das Erscheinungsbild des Produkts aufgearbeitet (Herrmann & Vetter, 2021, S. 18; Potting et al., 2017, S. 5).

R6 Remanufacture: Die Komponenten des ursprünglichen Produkts werden nicht gemeinsam weiterverwendet. Nur ein Teil der Komponenten des ursprünglichen Produkts werden aufgearbeitet und in einem neuen Produkt mit dem gleichen Funktionsumfang wiederverwendet (Herrmann & Vetter, 2021, S. 18; Kirchherr et al., 2017, S. 224).

R7 Repurpose: Die Komponenten des ursprünglichen Produkts werden, ebenfalls wie in der EoL Option R6 (Remanufacture), nicht gemeinsam weiterverwendet. Nur ein Teil der Komponenten des ursprünglichen Produkts wird aufgearbeitet und in einem neuen Produkt mit einem unterschiedlichen Funktionsumfang weiterverwendet (Herrmann & Vetter, 2021, S. 18; Kirchherr et al., 2017, S. 224).

Sinnvolles Verwenden von Materialien

In den Optionen R8 (Recycle) und R9 (Recover) können die Produkte und deren Bauteile nicht mehr weiterverwendet werden, weswegen nur ein Zerlegen in die einzelnen Rohstoffe oder die Rückgewinnung von Energie möglich ist (Buchberger et al., 2019, S. 11; Herrmann & Vetter, 2021, S. 19).

R8 Recycle: Diese EoL Option verarbeitet Produkte und deren Bauteile, welche am Ende ihres Produktlebenszyklus stehen. Mit Hilfe von technischen Verarbeitungsmethoden werden aus den einzelnen Materialien der Produkte und deren Bauteile Grundstoffe erzeugt. Diese Grundstoffe fließen anschließend in die Herstellung neuer Produkte, welche keine Gemeinsamkeiten mit dem ursprünglichen Produkt haben müssen, ein. Jedoch ist die Qualität der Grundstoffe nach dem Recyclen maximal gleichwertig wie die Qualität der Materialien des ursprünglichen Produkts und deren Bauteile (Buchberger et al., 2019, S. 15; Kirchherr et al., 2017, S. 224).

R9 Recover: Produkte und deren Bauteile, bei denen am Ende ihres Produktlebenszyklus die EoL Option R8 (Recycle) nicht mehr angewendet werden kann, da deren Materialqualität zu gering ist, werden verbrannt. Durch das Verbrennen der Materialien werden diese direkt vernichtet und deren restliche Energie in Form von Wärme freigegeben, womit Wärme oder Elektrizität gewonnen wird. Diese gewonnene Energie wird in den Kreislauf zurückgeführt. Jedoch ist diese EoL Option die letzte, um aus den Materialien der Produkte und Bauteile Wert zu schöpfen (Buchberger et al., 2019, S. 16; Kirchherr et al., 2017, S. 224; van Buren et al., 2016, S. 3).

Da sich diese Arbeit mit der Betrachtung von WKA, welche sich bereits am Ende ihres Produktlebenszyklus befinden, beschäftigt, wird sich im weiteren Verlauf nur auf die EoL Optionen R3 (Reuse) bis R9 (Recover) bezogen. Der Fokus dieser Arbeit soll auf den beiden Gruppen ‚*Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und deren Bauteile*‘ und ‚*Sinnvolles Verwenden von Materialien*‘ liegen.

2.2 Grundlagen Umweltauswirkungen

Zu Beginn dieses Unterkapitels wird der Begriff der Umwelt erläutert, um ein besseres Verständnis für die nachfolgende Beschreibung der Umweltauswirkungen zu erlangen. In der Literatur existieren verschiedene Definitionen und Abgrenzungen des Begriffs der Umwelt, weswegen in dieser Arbeit zwei Definitionen genauer dargestellt werden.

Nach dem ‚*Springer Umweltlexikon*‘ von Bahadir und Angerhöfer (1995) wurde der Begriff der Umwelt von Uexküll im Jahr 1921 als ein zentraler Ausdruck der Ökologie eingeführt. „Die Umwelt umfasst die Gesamtheit aller direkt und indirekt auf einen

Organismus, eine Population oder eine Biozönose einwirkenden abiotischen und biotischen Faktoren mit all ihren Wechselwirkungen.“ (Bahadir & Angerhöfer, 1995, S. 1070). Die Umwelt kann in Teilbereiche wie der sogenannten psychischen Umwelt, welche den Bereich der Sinneswahrnehmung eines Tieres betrachtet, oder die kosmische Umwelt, welche zusätzlich auch alle Wirkungen der Himmelskörper betrachtet, unterteilt werden (Bahadir & Angerhöfer, 1995, S. 1070). „Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff oft auf die Umwelt des Menschen eingeeengt und betrifft dann die Rückwirkungen des menschlichen Tuns auf diese Umwelt (Umweltverschmutzung).“ (Bahadir & Angerhöfer, 1995, S. 1070).

Eine weitere Definition des Begriffs der Umwelt stammt aus dem ‚*Öko-Lexikon*‘ von Simonis (2003), in dem die Umwelt als „[...] die Gesamtheit aller ökologischen Faktoren, mit denen ein Organismus oder eine Population in Wechselwirkung steht [...]“, definiert wird (Simonis, 2003, S. 198). Die ökologischen Faktoren werden zusätzlich in abiotische und biotische Faktoren unterteilt. Abiotische Faktoren sind beispielsweise Klimafaktoren (Temperatur, Luftfeuchte und atmosphärisches Kohlenstoffdioxid (CO₂)) und Emissionen (Schadstoffe, Lärm und Untergrund wie Sand, Lehm oder Urgestein), wohingegen biotische Faktoren beispielsweise Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere oder Menschen sind (Simonis, 2003, S. 198-199). Simonis (2003) definiert außerdem den Begriff der natürlichen Umwelt, welcher nach §2 des Bundesnaturschutzgesetzes Boden, Gewässer, Luft, Klima, wild lebende Tiere und Pflanzen sowie Landschaften als Lebensgrundlage benennt. „Auf diese sogenannte natürliche Umwelt bezieht sich der in der Gesetzgebung vorherrschende restriktive Umweltbegriff.“ (Simonis, 2003, S. 199).

Um die Überschaubarkeit des Umweltbegriffs im Rahmen zu halten, wird in dieser Arbeit der uns umgebende Kosmos nicht als Teil der Umwelt angesehen. Ebenfalls wird sich beim Begriff der Umwelt in dieser Arbeit auf die, von Simonis (2003) definierte, natürliche Umwelt bezogen. Grund dafür ist die hohe Relevanz dieser Begriffseinschränkung in Bezug auf den Themenschwerpunkt dieser Arbeit.

Die Umwelt lässt sich für diese Arbeit somit als die Gesamtheit der abiotischen und biotischen Faktoren wie Boden, Gewässer, Luft, Klima, wild lebende Tiere, Pflanzen und Landschaften, mit denen der Mensch in Wechselwirkung steht, definieren.

Im Folgenden werden die Umweltauswirkungen genauer betrachtet. So wird der Begriff der Umweltauswirkung in der ‚*Verordnung (EG) Nr. 1221/2009*‘ vom Europäischen Parlament und Rat der Europäischen Union (2009) als „[...] jede positive oder negative Veränderung der Umwelt, die ganz oder teilweise auf Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen einer Organisation zurückzuführen ist [...]“ definiert (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2009, S. 4).

Darüber hinaus definiert die ‚*Verordnung (EG) Nr. 1221/2009*‘ von Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2009) den Umweltaspekt als „[...] denjenigen Bestandteil der Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen einer Organisation, der Auswirkungen auf die Umwelt hat oder haben kann [...]“ (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2009, S. 4). Neben der Einstufung eines Umweltaspekts in einen bedeutenden Umweltaspekt, welcher „[...] bedeutende Umweltauswirkungen hat oder haben kann [...]“, kann ein Umweltaspekt ebenfalls in einen direkten oder indirekten Umweltaspekt eingestuft werden (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2009, S. 4). Ein direkter Umweltaspekt steht „[...] im Zusammenhang mit Tätigkeiten, Produkten und Dienstleistungen der Organisation selbst, der deren direkter betrieblicher Kontrolle unterliegt [...]“ wohingegen ein indirekter Umweltaspekt „[...] das Ergebnis der Interaktion einer Organisation mit Dritten sein und in angemessenem Maße von einer Organisation beeinflusst werden kann [...]“ (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2009, S. 4).

In den in Kapitel 1.2 ‚Forschungsfragen und Ziel der Arbeit‘ definierten Forschungsfragen wird der Begriff der ökologischen Umweltauswirkungen verwendet. Dieser Begriff wird in dieser Arbeit als eine Kombination der Definitionen der Umweltauswirkung nach Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2009) und der natürlichen Umwelt von Simonis (2003) angesehen.

Somit ergibt sich die Definition der ökologischen Umweltauswirkungen als alle positiven wie auch negativen Veränderungen der natürlichen Umwelt, welche ganz oder teilweise auf Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen einer Organisation zurückzuführen sind.

2.3 Grundlagen Bepreisung

Bereits im frühen 20. Jahrhundert wurde in verschiedenen Literaturquellen auf die Suche nach einer universellen Definition des Preises gegangen. Ein Beispiel bietet die Arbeit ‚*The Definition of Price*‘ von Fetter (1912), in dem der Autor 117 unterschiedliche Definition des Preises aus Literaturquellen der Universitätsbibliotheken von Princeton und Columbia untersuchte und klassifizierte (Fetter, 1912, S. 783). Zum einen wurden die Definitionen des Preises nach dem Wert klassifiziert, wie beispielsweise dem objektiven und subjektiven Wert. Zum anderen wurden die Definitionen des Preises nach der monetären und nicht-monetären Definition des Preises klassifiziert (Fetter, 1912, S. 784).

Nach Fetter (1912) ergibt sich somit die Definition des Preises als: „Price is the quantity of goods given or received in exchange for another good.“ (Fetter, 1912, S. 813). Zwar wurde diese Definition des Preises aus einer Vielzahl von Definitionen entwickelt, jedoch merkt Fetter (1912) in seiner Zusammenfassung selbst an, dass es noch kein

allgemeines Einverständnis über eine internationale Definition des Preises gibt (Fetter, 1912, S. 813).

Diese Aussage wird auch in aktuellen Literaturquellen wie von Faith und Edwin (2014) bestätigt. „Price means different things to different people; it is interest to lenders, COT or service charged by the banker (lenders), premium to the insurer, fare to the transporter, honorarium to the guest lecturer etc.“ (Faith & Edwin, 2014, S. 88).

Eine jüngere Definition des Preises nach Faith und Edwin (2014) lautet wie folgt: „Price is the amount a customer pays for a product or the sum of the values that consumers exchange for the benefits of having or using a product or service.“ (Faith & Edwin, 2014, S. 88).

Um eine Definition des Wortes Bepreisung (englisch (engl.) pricing) zu nennen, wird die Business-Englisch-Definition aus dem Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus verwendet: „The way that a company decides prices for its products or services, or the prices decided.“ (Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus, 2023).

Anhand der eben dargestellten Abweichungen der unterschiedlichen Definitionen des Preises kann keine universelle Definition ausgemacht werden. Die Definition des Preises soll aus diesem Grund auf das Themengebiet dieser Arbeit ausgerichtet werden. Da sich diese Arbeit mit der Bepreisung von ökologischen Umweltauswirkungen von EoL Optionen an WKA beschäftigt, werden im nachfolgenden Unterkapitel die Grundlagen der Bepreisung von ökologischen Umweltauswirkungen genauer untersucht und dargestellt.

2.3.1 Bepreisung von ökologischen Umweltauswirkungen

Die Bepreisung von ökologischen Umweltauswirkungen kann auf unterschiedliche Arten und Weisen durchgeführt werden. Um einen umfänglichen Überblick über mögliche Methoden zu schaffen, werden verschiedene theoretische, sowie auch praktische Bepreisungsmethoden aus Literatur und Politik vorgestellt.

Eine häufig verwendete Methode ist die Pigou-Besteuerung von schädlichen Aktivitäten nach dem britischen Ökonom Arthur C. Pigou (Remeur, 2020, S. 2). „A Pigovian fee is a fee paid by the polluter per unit of pollution exactly equal to the aggregate marginal damage caused by the pollution [...]. The fee is generally paid to the government.“ (Kolstad, 2000, S. 118). Den Wirtschaftsteilnehmern wird somit durch die erhobene Steuer ein Anreiz gegeben, die schädlichen Auswirkungen ihrer Tätigkeiten auf die Umwelt zu verringern, statt die Kosten der Umweltschäden in Form der Steuer zu bezahlen (Remeur, 2020, S. 2).

Eine weitere Methode bietet der Pricing and Standards Ansatz von Baumol und Oates (1971). Dieser basiert auf einem zu Beginn festgelegten Satz von Umweltqualitätsstandards (Baumol & Oates, 1971, S. 51). Als Beispiel eines möglichen Standards nennen Baumol und Oates (1971) die Festlegung eines maximalen Grenzwertes für den Schwefeldioxid-Anteil der Luft innerhalb eines Stadtgebiets (Baumol & Oates, 1971, S. 44). Ausgehend dieser Standards werden dann Steuern pro Einheit (oder Subventionen) erhoben, um diese zu erreichen. Ein Vorteil dieses Ansatzes gegenüber einer Pigou-Besteuerung liegt darin, dass keine Informationen benötigt werden, welche es zur Bestimmung der Kosten durch schädliche Aktivitäten bedarf (Baumol & Oates, 1971, S. 51).

Neben den eben genannten theoretischen Methoden werden nun bereits praktisch umgesetzte Beispiele aus der Politik dargestellt.

Die Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) definiert ebenfalls eine Methode im Paper *'Environmental Principles and Concepts'*. Das Verursacherprinzip (engl. Polluter Pays Principle) ist im Wesentlichen ein wirtschaftspolitischer und kein rechtlicher Grundsatz. Es wurde bereits 1972 im OECD Guiding Principles on the International Economic Aspects of Environmental Policies definiert und besagt, dass der Verursacher die Kosten für die Durchführung von Maßnahmen zur Vermeidung von Umweltverschmutzung oder für die Behebung von, durch Umweltverschmutzung verursachten, Schäden zu tragen hat (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1995, S. 12).

Das europäische Parlament nutzt eine Methode zur Erhöhung der Kosten von Aktivitäten, die Umweltverschmutzung verursachen oder die Umwelt schädigen. Unter dem Begriff der Umweltbesteuerung (engl. environmental taxation) wird diese Methode umgesetzt, welche die entsprechenden sozialen Kosten, die sogenannten negativen externen Effekte, gemäß dem Verursacherprinzip einbezieht (Remeur, 2020, S. 2). Ziel der Umweltbesteuerung besteht darin, Umweltschäden oder negative externe Effekte in die Preise einzubeziehen, um Produktions- und Verbrauchsentscheidungen in eine umweltfreundlichere Richtung zu lenken (Remeur, 2020, S. 1).

Der Einsatz steuerlicher Maßnahmen kann eine der Optionen sein, die den Mitgliedstaaten zur Verfügung stehen, um Verpflichtungen und Zielvorgaben zu erfüllen. So umfasst die EU Umweltpolitik folgende neun Bereiche, für die Ziele und Zielvorgaben festgelegt wurden: Energie, Treibhausgasemissionen und ozonabbauende Stoffe, Luftqualität und Luftverschmutzung, verkehrsbedingte Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen, Abfall, Wasser, nachhaltiger Verbrauch und nachhaltige Produktion, Chemikalien, biologische Vielfalt und Landnutzung (Remeur, 2020, S. 3).

Auch in Österreich wird die Bepreisung von ökologischen Umweltauswirkungen umgesetzt. Unter dem Begriff der Ökosozialen Steuerreform, welche in dem von der österreichischen Bundesregierung am 3. Oktober 2021 vorgestellten Steuerreformpaket veröffentlicht wurde, ist die Bepreisung von CO₂-Emissionen verankert. „Mit dieser Bepreisung von Treibhausgasen folgt Österreich einer sowohl in Europa als auch global immer stärker werdenden Tendenz. Dieses Instrument soll Anreize für die Restrukturierung des Wirtschafts- und Lebensstils setzen, die nicht nur den Klimawandel eindämmen helfen, sondern auch Wohlstand, Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit stärken.“ (Köppl et al., 2021, S. 1). Im Jahr 2022 liegt die Abgabe für eine emittierte Tonne CO₂ bei einem Preis von 30€. Ende 2023 liegt dieser bereits bei 32,50€ (Wien Energie GmbH, 2023). Bis 2025 soll die Abgabe für eine emittierte Tonne CO₂ auf einen Preis von 55€ erhöht werden (Köppl et al., 2021, S. 2).

2.4 Grundlagen Windkraftanlage

Das Konzept der Umwandlung von Windenergie in Elektrizität hat sich aus einigen experimentellen Projekten in den späten 70er und frühen 80er Jahren entwickelt und ist mittlerweile eine der am schnellsten wachsenden Energiequellen der Welt (Andersen, 2015, S. 4; Andersen et al., 2016, S. 1). Die kinetische Energie des Windes wird hierbei in Rotationsenergie und schließlich Elektrizität umgewandelt. Windkraftanlagen (WKA) sind in unterschiedlichen Bauarten und Größen verfügbar, wobei sich in dieser Arbeit auf horizontalachsige WKA beschränkt wird. Die durchschnittliche Nutzungsdauer einer WKA liegt bei ungefähr 20 Jahren (Andersen et al., 2016, S. 1). Eine horizontalachsige WKA besteht grundsätzlich aus einem Fundament, einem Turm, einer Gondel, einem Rotor, einem Transformator und einem elektronischen System mit Verkabelung (Scherhauser et al., 2020, S. 42). Zusätzlich unterscheidet sich die Technologie zur Umwandlung der Leistung in Turbinen mit Getriebe und getriebelessen Turbinen (Scherhauser et al., 2020, S. 41). WKA mit getriebelessen Turbinen übertragen die Rotation der Rotorblätter direkt an den Generator, welcher durch die langsame Rotationsgeschwindigkeit größer ausgelegt werden muss. Ebenfalls beinhalten diese Turbinen Permanentmagneten, welche seltene Erden enthalten können. WKA mit Turbinen mit Getriebe übertragen die Rotation der Rotorblätter zuerst an das Getriebe und anschließend an den Generator. Somit kann die langsame Rotationsgeschwindigkeit der Rotorblätter mit Hilfe des Getriebes erhöht werden, wodurch am Generator eine höhere Rotationsgeschwindigkeit erreicht wird und dieser kleiner ausgelegt werden kann (Andersen, 2015, S. 7; Scherhauser et al., 2020, S. 41).

Der Aufbau einer WKA ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

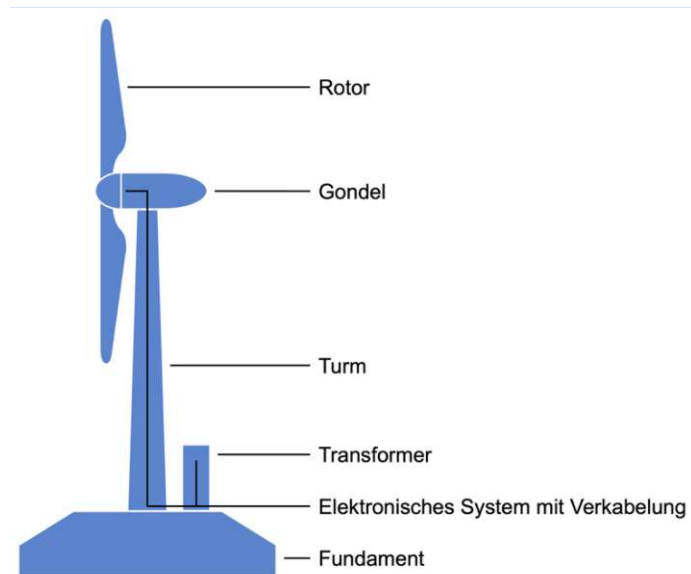


Abbildung 4: schematischer Aufbau einer Windkraftanlage

In Bezug auf die Massenanteile der einzelnen Komponenten einer WKA ist zu erkennen, dass das Fundament mit ca. 76% den größten Massenanteil besitzt. Nachfolgend nimmt mit ca. 22% die Turbine den zweitgrößten Massenanteil an. Die Verkabelung nimmt ca. 1% ein. Alle restlichen Bauteile enthalten weniger als 1% Massenanteil (Scherhauffer et al., 2020, S. 42). Die Turbine besteht aus den Komponenten Turm, Gondel und Rotor. Bei der Betrachtung der Massenanteile der Turbine ist zu erkennen, dass der Turm den höchsten Massenanteil mit 60% bis 70% einnimmt. Der restliche Anteil von 30% bis 40% verteilt sich auf die Gondel und den Rotor (Andersen, 2015, S. 6-7).

In Abbildung 5 werden die Massenanteile der Komponenten einer WKA, angelehnt an Scherhauffer et al. (2020), visualisiert.

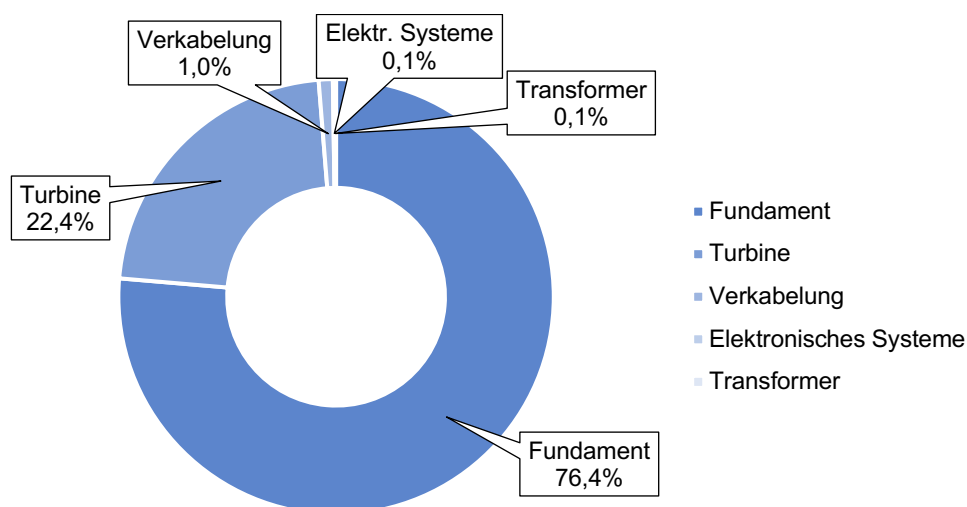


Abbildung 5: Massenanteile der Komponenten einer WKA (angelehnt an Scherhauffer et al. (2020, S. 42))

In Bezug auf die enthaltenen Materialien der einzelnen Komponenten ist zu erkennen, dass das Fundament aus ca. 95% Beton und ca. 5% Stahl besteht. Der Turm setzt sich aus ca. 95% Stahl und den restlichen Prozenten aus Aluminium, Kupfer und glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) zusammen. Die Gondel besteht größtenteils aus Stahl, Kupfer, Eisen, Aluminium und GFK (Andersen, 2015, S. 6-7). Die Rotorblätter setzen sich zu ca. 93% aus GFK oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK), 2% Polyvinylchlorid (PVC), 2% Balsaholz und 3% weiterer Materialien wie Stahl und Farbe zusammen (Chikha et al., 2022, S. 1). Der Transformator und das elektronische System mit Verkabelung bestehen aus Eisen und Kupfer, wohingegen das elektronische System mit Verkabelung zusätzlich Polymere, Aluminium, Blei, Silicium, Epoxidharz und weitere Materialien enthält (Scherhauser et al., 2020, S. 42). Betrachtet man die gesamte WKA, so ergibt sich ein Anteil von ca. 72% Beton, 24% Eisenmetalle, 2% Polymere, 1% GFK/CFK, 1% Buntmetalle und weiterer Materialien (Scherhauser et al., 2020, S. 42). Die Materialaufteilung einer WKA, angelehnt an Scherhauser et al. (2020), ist in Abbildung 6 dargestellt.

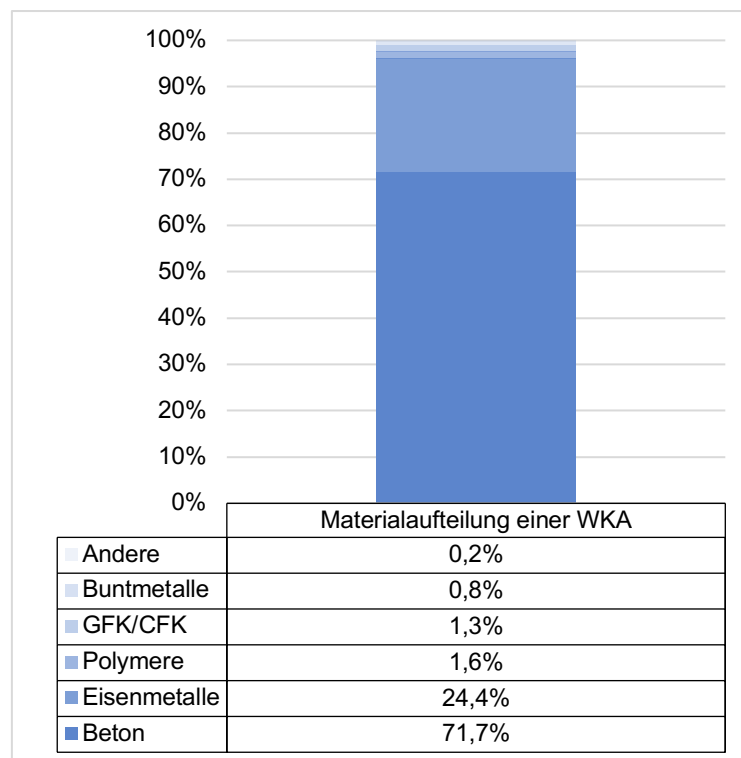


Abbildung 6: Materialaufteilung einer WKA (angelehnt an Scherhauser et al. (2020, S. 42))

Die expliziten Werte in Kilogramm (kg) pro Megawatt (MW), welche für die Berechnung der prozentualen Anteile der Abbildung 5 und Abbildung 6 verwendet wurden, sind in Kapitel 13 ‚Anhang‘ in Tabelle 21 und Tabelle 22 enthalten.

Hinsichtlich der Windkraftleistung in Österreich, welche in Abbildung 7 dargestellt ist, ist zu erkennen, dass die Anzahl der jährlich zugebauten WKA in den Jahren 2001 bis 2006 stark angestiegen ist. Die Windkraftleistung ist in diesen Jahren ebenfalls von 94 MW (2001) auf 968 MW (2006) gestiegen. Zwischen 2006 und 2010 wurden nahezu

keine neuen WKA errichtet und in Betrieb genommen, weswegen die Windkraftleistung beinahe konstant geblieben ist. Ab 2011 wurden jährlich wieder deutlich mehr WKA zugebaut, wodurch die Windkraftleistung kontinuierlich anstieg und im Jahr 2023 eine Leistung von 3.885 MW erreichte. Zwischen den Jahren 2001 und 2017 wurden einzelne WKA abgebaut und vom Netz genommen. Hingegen erhöhte sich die Anzahl abgebauter WKA zwischen den Jahren 2018 und 2023 und lag bei einer Anzahl von 37 bis 103 jährlich abgebauten WKA. Ende 2023 waren 1.426 WKA in Österreich in Benutzung, wobei die Leistung der einzelnen Windkraftanlagen zwischen 110 KW und 7,5 MW lag (IG Windkraft, 2024a, 2024b).



Abbildung 7: Windkraftleistung in Österreich - Ende 2023 und Prognose 2024 (IG Windkraft, 2024a)

3 Aktueller Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand, in Bezug auf die gestellten Subforschungsfragen aus Kapitel 1.2 ‚Forschungsfragen und Ziel der Arbeit‘, erarbeitet und dargestellt.

Zu Beginn wird die Methode der systematischen Literaturrecherche (SLR) beschrieben. Anschließend wird die in dieser Arbeit durchgeführte SLR, inklusive der spezifischen Rahmenbedingungen, der Durchführung selbst und eines Fazits, dargestellt. Nachfolgend wird das Ergebnis der SLR erläutert. Zuletzt wird der aktuelle Stand der Forschung beschrieben und die gestellten Subforschungsfragen beantwortet.

3.1 Systematische Literaturrecherche

Um die gestellten Subforschungsfragen aus Kapitel 1.2 ‚Forschungsfragen und Ziel der Arbeit‘ umfassend und nahe des aktuellen Forschungsstandes beantworten zu können, wird eine SLR durchgeführt.

Mit Hilfe einer SLR lassen sich viele relevante Forschungsarbeiten, welche für die Beantwortung der gestellten Forschungsfragen benötigt werden, identifizieren, evaluieren und interpretieren (Kitchenham et al., 2007, S. 3). In dieser Arbeit dient die SLR der Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstandes, bezogen auf die gestellten Subforschungsfragen. Die Erfassung von Lücken aktueller Forschungsbereiche oder die Vorarbeit zur Ergründung neuer Forschungsbereiche können ebenfalls ein Grund zur Anwendung einer SLR sein (Snyder, 2019, S. 333).

Einer der wichtigsten Aspekte einer SLR ist die ganzheitliche Betrachtung der verfügbaren Quellen und Informationen. Daraus folgt die neutrale Berücksichtigung aller befürwortenden, wie auch nicht befürwortenden Fakten zur Beantwortung der gestellten Forschungsfragen (Kitchenham et al., 2007, S. 3). Zudem muss die SLR transparent, so gut wie möglich reproduzierbar und ausreichend detailliert dokumentiert sein, um dem Leser die Möglichkeit zur eigenen Bewertung der Arbeit und der Gründlichkeit der Recherche geben zu können (Kitchenham et al., 2007, S. 16).

3.1.1 Methodik der systematischen Literaturrecherche

Die in dieser Arbeit verwendete Methodik entspricht den Methodiken einer systematischen Recherche, angelehnt an Kitchenham et al. (2007) und Tranfield et al. (2003).

Die hier verwendete SLR wird in die fünf Phasen '*Definition der Forschungsfrage*', '*Entwicklung eines Rechercheprotokolls*', '*Suche der Literatur*', '*Auswahl der Literatur*' und '*Dokumentation der Recherche*' aufgeteilt. Die ersten vier Phasen sind an die drei Hauptphasen und deren Unterphasen einer systematischen Recherche von Kitchenham et al. (2007, S. 6) und Tranfield et al. (2003, S. 214) angelehnt. In der letzten Phase wird der Prozess der SLR transparent und nachvollziehbar nach Kitchenham et al. (2007, S. 16) festgehalten.

Erste Phase (Definition der Forschungsfrage)

In der ersten Phase (Definition der Forschungsfrage) werden die Forschungsfrage oder mehrere Forschungsfragen der Arbeit definiert, was die wichtigste Aufgabe jeder systematischen Recherche darstellt (Kitchenham et al., 2007, S. 9). Durch die eindeutige Definition der Fragestellung wird die Richtung und die Methodik der gesamten Recherche festgelegt, wodurch erstmals eine Bewertung von Informationen bezüglich ihrer Relevanz möglich ist (Kitchenham et al., 2007, S. 9). Erst somit lassen sich Suchbegriffe und weitere Suchkriterien, die für die nachfolgenden Phasen notwendig sind, genau definieren. Jedoch sollte die Fragestellung nicht zu präzise definiert werden, da während der Durchführung einer systematischen Recherche oftmals Informationen erfasst werden, die zu Beginn noch nicht bekannt sind. Raum für etwaige Erweiterungen wird somit realisiert (Läzer et al., 2010, S. 5).

Zweite Phase (Entwicklung eines Rechercheprotokolls)

In der zweiten Phase (Entwicklung eines Rechercheprotokolls) wird ein Rechercheprotokoll entwickelt, welches die Methoden definiert, um die systematische Recherche durchzuführen. Ein wichtiges Ziel des Rechercheprotokolls ist die Vermeidung einer möglichen Befangenheit des Rechercheurs gegenüber der Thematik, da die Auswahl der verwendeten Quellen sonst auf Basis der Rechercheerwartung des Rechercheurs getroffen wird (Kitchenham et al., 2007, S. 12).

Zum einen werden im Rechercheprotokoll die zu verwendenden Suchmaschinen und Bibliotheken, und zum anderen die Suchbegriffe, Schlagwörter und Suchfilter festgelegt. Die Auswahl der zu verwendenden Suchmaschinen und Bibliotheken ist abhängig von deren Größe, wissenschaftlicher Qualität und spezifischem Fachbereich. Um eine ausreichend große Anzahl an Literatur zu finden, bedarf es der Verwendung mehrere Suchmaschinen und Bibliotheken (Kitchenham et al., 2007, S. 17).

Bei der Definition von Suchbegriffen und Schlagwörtern ist auf deren Relevanz, bezogen auf die Forschungsfrage, zu achten (Kitchenham et al., 2007, S. 19). Deren Detaillierungsgrad lässt sich durch eine Unterteilung der Forschungsfrage in Suchschwerpunkte zusätzlich erhöhen, wodurch die Suche nach Literatur genauer

durchgeführt werden kann. Des Weiteren ist es hilfreich, neben der deutschen, auch die englische Übersetzung zu verwenden, um mehr Treffer erzielen zu können.

Um nach Variationen der bereits existierenden Suchbegriffe und Schlagwörter zu suchen, besteht die Möglichkeit der Verwendung von Trunkierungen und Wildcards, welche die Sucheingabe zusätzlich kürzer und einfacher gestalten (Scopus LibGuide, 2023).

Beim Trunkieren wird dem Suchbegriff ein <*> Zeichen vor- oder nachgehängt, oder auch mit einem Buchstaben des Suchbegriffs ersetzt. Anstelle des <*> Zeichens werden nun beliebig viele Buchstabenkombinationen bei der Suche berücksichtigt. Die Suche mit dem Suchbegriff ‚method*‘ liefert beispielsweise die Ergebnisse ‚methods‘, ‚methodology‘, ‚Methodik‘ oder ‚method‘ (Läzer et al., 2010, S. 5).

Bei der Verwendung von Wildcards wird dem Suchbegriff ein <?> Zeichen vor- oder nachgehängt, oder auch mit einem Buchstaben des Suchbegriffs ersetzt. Anstelle des <?> Zeichens wird nun ein variabler Buchstabe bei der Suche berücksichtigt. Die Suche mit dem Suchbegriff ‚produc??‘ liefert beispielsweise die Ergebnisse ‚produced‘ oder ‚producer‘, jedoch nicht ‚production‘, ‚producing‘ oder ‚product‘ (Läzer et al., 2010, S. 5-6).

Zur weiteren Eingrenzung der relevanten Suchergebnisse dient die Verwendung eines Suchfilters, der ebenfalls im Rechercheprotokoll definiert wird. Der Suchfilter definiert Ein- und Ausschlusskriterien für die spätere Suche. Somit lässt sich bei der Suche gezielt Literatur ein- oder ausschließen, die in einem gewissen Zeitraum veröffentlicht oder in einer gewissen Sprache verfasst wurde. Neben dem Jahr der Veröffentlichung und der Sprache der Literatur, ist auch der Publikationstyp ein mögliches Filterkriterium (Kitchenham et al., 2007, S. 19).

Dritte Phase (Suche der Literatur)

In der dritten Phase (Suche der Literatur) wird die bereits entwickelte Recherchestrategie verwendet, um fachspezifische Literatur ausfindig zu machen. Es wird mit den bereits definierten Suchbegriffen in den bereits ausgewählten Datenbanken mit den bereits definierten Suchfiltern nach Literatur gesucht. Der Fokus sollte hierbei auf einer unvoreingenommenen Suchstrategie und der Suche nach Primärliteratur liegen (Kitchenham et al., 2007, S. 14).

Um die Vielzahl der Suchbegriffe innerhalb einer einzelnen Suche gemeinsam berücksichtigen zu können, bedarf es an Booleschen Operatoren. Die drei Operatoren AND, OR und NOT werden, je nach Bedarf, mit den Suchbegriffen in das Suchfeld der Datenbank eingegeben (Läzer et al., 2010, S. 6).

Der Operator AND ist wörtlich mit UND zu übersetzen und bewirkt bei Verbinden von mehreren Suchbegriffen eine Suche, bei der alle Suchbegriffe in einem geforderten Abschnitt, der in einer Datenbank vorhandenen Literatur, vorkommen müssen.

Der Operator OR ist wörtlich mit ODER zu übersetzen und bewirkt bei Verbinden von mehreren Suchbegriffen eine Suche, bei der nur ein einziger Suchbegriff in einem geforderten Abschnitt, der in einer Datenbank vorhandenen Literatur, vorkommen muss.

Der Operator NOT ist wörtlich mit NICHT zu übersetzen und bewirkt bei Verbinden mit einem Suchbegriff eine Suche, bei der der Suchbegriff in einem geforderten Abschnitt, der in einer Datenbank vorhandenen Literatur, nicht vorkommen darf.

Es ist anzumerken, dass die bereits vor der Suche definierten Suchbegriffe, Datenbanken und Suchfilter nicht zwangsläufig die passende fachspezifische Literatur ausfindig machen. Deshalb ist es nötig, diese Rahmenbedingungen der Suche als nicht absolut starr anzusehen. Eine Verfeinerung der Suchbegriffe und der Suchfilter während der dritten Phase sind oftmals nötig, um die systematische Recherche objektiv und unbefangen weiterführen zu können (Kitchenham et al., 2007, S. 18).

Vierte Phase (Auswahl der Literatur)

In der vierten Phase (Auswahl der Literatur) wird die in der dritten Phase (Suche der Literatur) gefundene Literatur, mit Hilfe der bereits gesammelten Informationen während der systematischen Recherche und dem Begutachten der gefundenen Literatur aus der dritten Phase, gefiltert.

Hierzu werden der Titel und das Abstract, der in der dritten Phase gefundenen Literatur, begutachtet (Läzer et al., 2010, S. 8). Eines der wichtigsten Kriterien für die Auswahl der relevanten Literatur ist die direkte Beantwortung der Forschungsfrage durch die Literatur selbst (Kitchenham et al., 2007, S. 18). Nachdem die Vorauswahl der gefundenen Literaturen durch das Begutachten des Titels und Abstracts durchgeführt wurde, wird die Literaturlauswahl der Vorauswahl vollständig oder nur kapitelspezifisch durchgearbeitet und nochmals gefiltert (Tranfield et al., 2003, S. 215). Mit Hilfe von Ausschlusskriterien, welche sich an der Forschungsfrage und dem Ziel der Arbeit orientieren, wird die Entscheidung der Literaturlauswahl zusätzlich erleichtert (Neumann, 2018).

Schlussendlich bleibt eine stark minimierte Auswahl an relevanter Literatur über, die für die Berücksichtigung in der eigenen Arbeit herangezogen wird. Dies bedeutet jedoch nicht, dass jede der schlussendlich ausgewählten Literatur in der eigenen Arbeit verwendet wird.

Fünfte Phase (Dokumentation der Recherche)

In der fünften Phase (Dokumentation der Recherche) wird der Prozess der systematischen Recherche festgehalten, um dem Leser eine transparente und nachvollziehbare Dokumentation zu bieten. Hierbei ist es nötig, ausreichend detailliert zu dokumentieren, damit der Leser in der Lage ist, die Gründlichkeit der systematischen Recherche selbst bewerten zu können. Neben dem Namen der Datenbank, der Suchstrategie oder dem Datum der Recherche gibt es weitere Informationen, die den Detailgrad der Dokumentation erhöhen (Kitchenham et al., 2007, S. 16). Das in dieser Arbeit verwendete Rechercheprotokoll wird in Form einer Microsoft-Excel (MS-Excel) Tabelle entwickelt, worin der Prozess der systematischen Recherche dokumentiert wird. Es beinhaltet allgemeine Informationen wie die Definition der Subforschungsfrage und ein Abkürzungsverzeichnis, um die einzelnen Felder möglichst klein und übersichtlich gestalten zu können.

Um die Randbedingungen der einzelnen Suchvorgänge der systematischen Recherche detailliert dokumentieren zu können, wird eine Datenbank- / Suchschwerpunkt- / Suchbegriff-Matrix verwendet. Diese dient zur Entschlüsselung der selbst erstellten und individuellen Suchbegriff-IDs, die für die einzelnen Suchschwerpunkte in der jeweiligen Datenbank die genauen Suchbegriffe definieren.

Für die Erfassung der Resultate jeder Suche wird das Datum der Suche, die Suchbegriff-ID, der Suchfilter, die Gesamtanzahl der angezeigten Treffer, die Anzahl der durchsuchten Treffer, die Suchstrategie nach der die relevante Literatur ausgewählt wird und die final ausgewählte Literatur dokumentiert. Zusätzlich werden Titel, Autoren, Jahr der Veröffentlichung und Anzahl der Zitierungen jeder final ausgewählten Literatur dokumentiert.

3.1.2 Definition der Rahmenbedingungen der fünf Phasen

Erste Phase (Definition der Forschungsfrage)

Die FF1, FF2 und FF3, welche bereits in Kapitel 1.2 ‚Forschungsfragen und Ziel der Arbeit‘ definiert wurden, sollen anhand dieser SLR beantwortet werden. Die drei Subforschungsfragen werden im Nachfolgenden nochmals genannt:

- FF1: „**Was ist der aktuelle Stand der Forschung und Technik bezüglich realisierbarer End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen?**“
- FF2: „**Was ist der aktuelle Stand der Forschung bezüglich möglicher Bepreisungsmethoden der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen?**“

- FF3: „**Welche Eigenschaften besitzen die in FF2 identifizierten Bepreisungsmethoden und wie umfänglich sind diese?**“

Zweite Phase (Entwicklung des Rechercheprotokolls)

Für diese SLR werden die drei Datenbanken Scopus (SC), ScienceDirect (SD) und Google Scholar (GS) verwendet. Diese Datenbanken durchsuchen eine hohe Anzahl an wissenschaftlicher Literatur, wodurch die SLR an Qualität und Breite gewinnt. Zu Beginn werden die beiden Datenbanken SC und SD herangezogen, da deren Darstellung, Übersichtlichkeit und Filtermöglichkeiten im Vergleich zu GS höher sind. Werden in den Suchen der einzelnen Suchschwerpunkte in den Datenbanken SC und SD bereits zufriedenstellende Ergebnisse erzielt, wird auf eine weitere Suche in der Datenbank GS verzichtet.

Die Suchbegriffe ‚end of life‘, ‚end-of-life‘, ‚eol‘, ‚option‘ und ‚wind‘ definieren den Kern der FF1. Die Suchbegriffe ‚concept‘, ‚strategy‘, ‚method‘, ‚model‘, und ‚window‘ erweitern die Wahl der Suchbegriffe, um Ergebnisse nahe der FF1 zu erhalten.

Die Suchbegriffe ‚end of life‘, ‚end-of-life‘, ‚eol‘, ‚option‘, ‚wind‘, ‚pricing‘, ‚environmental pricing‘, ‚monetization‘ und ‚monetizing‘ definieren den Kern der FF2 und FF3. Die Suchbegriffe ‚concept‘, ‚strategy‘, ‚method‘, ‚model‘, ‚window‘, ‚cost estimation‘, ‚cost predication‘, ‚financial performance‘, ‚ecological‘ und ‚impact category‘ erweitern die Wahl der Suchbegriffe, um Ergebnisse nahe der FF2 und FF3 zu erhalten.

Der Suchfilter dieser SLR filtert nach zwei Kriterien. Das erste Kriterium ist die Sprache der Literatur. Mit Hilfe dieses Kriteriums wird jede beliebige Sprache der Literatur erfasst, wodurch auch international publizierte Literatur berücksichtigt wird. Das zweite Kriterium ist der Abschnitt der Literatur, auf den die definierten Suchbegriffe angewendet werden. Der hier verwendete Suchfilter wendet die definierten Suchbegriffe auf den Titel, das Abstract und die Schlagworte der Literatur in den Datenbanken SC und SD an. Durch die Wahl des Suchfilters verringert sich die Anzahl an fälschlicherweise übereinstimmenden Treffern. Bei der Suche in der Datenbank GS wird der Suchfilter zusätzlich auf den gesamten Inhalt der Literatur angewendet.

Dritte Phase (Suche der Literatur)

Bei der Suche nach Literatur für die Beantwortung der FF1 werden die Suchbegriffe ‚end of life‘, ‚end-of-life‘ und ‚eol‘ jeweils mit dem Booleschen Operator OR verbunden, da diese denselben Begriff unterschiedlich ausdrücken. Die Suchbegriffe ‚option‘, ‚concept‘, ‚strategy‘, ‚method‘ und ‚model‘ werden ebenfalls mit dem Booleschen Operator OR verbunden, da diese sich ähneln. Mit dem Booleschen Operator AND werden die eben genannten Suchbegriffe mit dem Suchbegriff ‚wind‘ verbunden. Der Suchbegriff ‚window‘ wird mit dem Booleschen Operator NOT angebunden, um fälschlicherweise übereinstimmende Treffer zu reduzieren. Zusätzlich enthalten die

Suchbegriffe ‚option‘, ‚concept‘, ‚strategy‘, ‚method‘, ‚model‘ und ‚wind‘ eine Trunkierung <*> am Ende, um Erweiterungen des Grundworts einzuschließen und zusätzlich relevante Ergebnisse zu erzielen.

Für die Datenbank Scopus ergibt sich folgender Sucheintrag, gekennzeichnet mit der Suchbegriff-ID SC1:

SC1 ("end of life" OR "end-of-life" OR "eol") AND ("concept*" OR "strateg*" OR "option*" OR "method*" OR "model*") AND ("wind*") AND NOT ("window")

Da das Suchfeld der Datenbank ScienceDirect keine <*> Trunkierungen berücksichtigt und nur eine maximale Anzahl von acht Booleschen Operatoren zulässt, ergibt sich der Sucheintrag für diese Datenbank, gekennzeichnet mit der Suchbegriff-ID SD1, wie folgt:

SD1 ("end of life" OR "end-of-life" OR "eol") AND ("strategy" OR "option" OR "method" OR "model") AND ("wind") NOT ("window")

Bei der Suche nach Literatur für die Beantwortung der FF2 und FF3 werden die Suchbegriffe ‚end of life‘, ‚end-of-life‘ und ‚eol‘ jeweils mit dem Booleschen Operator OR verbunden, da diese denselben Begriff unterschiedlich ausdrücken. Die Suchbegriffe ‚option‘, ‚concept‘, ‚strategy‘, ‚method‘ und ‚model‘ werden ebenfalls mit dem Booleschen Operator OR verbunden, da diese sich ähneln, sowie die Suchbegriffe ‚pricing‘, ‚cost estimation‘, ‚cost predication‘ und ‚financial performance‘. Mit dem Booleschen Operator AND werden die eben genannten Suchbegriffe mit den Suchbegriffen ‚wind‘ und ‚ecological‘ verbunden.

Die Suchbegriffe ‚monetization‘ und ‚monetizing‘, sowie ‚method‘ und ‚methodology‘ werden jeweils mit dem Booleschen Operator OR verbunden, da diese denselben Begriff unterschiedlich ausdrücken. Ebenfalls werden die Suchbegriffe ‚environmental‘ und ‚impact category‘ mit dem Booleschen Operator OR verbunden. Mit dem Booleschen Operator AND werden die eben genannten Suchbegriffe miteinander verbunden.

Zusätzlich enthalten die Suchbegriffe ‚option‘, ‚concept‘, ‚strategy‘, ‚method‘, ‚model‘, ‚wind‘, ‚cost estimation‘, ‚cost predication‘, ‚financial performance‘ und ‚impact category‘ eine Trunkierung <*> am Ende, um Erweiterungen des Grundworts einzuschließen und zusätzlich relevante Ergebnisse zu erzielen.

Für die Datenbank Scopus ergeben sich folgende Sucheinträge, gekennzeichnet mit den Suchbegriff-IDs SC2, SC3 und SC4:

SC2 ("end of life" OR "end-of-life" OR "eol") AND ("concept*" OR "strateg*" OR "option*" OR "method*" OR "model*") AND ("wind*") AND ("pricing" OR "cost estimation*" OR "cost predication*" OR "financial performance*")

SC3 ("environmental pricing")

SC4 ("monetization" OR "monetizing") AND ("environmental" OR "impact categor*") AND ("method" OR "methodolog*")

Für die Datenbank Google Scholar ergibt sich folgender Sucheintrag, gekennzeichnet mit der Suchbegriff-ID GS2:

GS2 ("end of life" OR "end-of-life" OR "eol") AND ("concept*" OR "strateg*" OR "option*" OR "method*" OR "model*") AND ("wind*") AND ("pricing" OR "cost estimation*" OR "cost predication*" OR "financial performance*") AND ("ecological")

Da das Suchfeld der Datenbank ScienceDirect keine <*> Trunkierungen berücksichtigt und nur eine maximale Anzahl von acht Booleschen Operatoren zulässt, ergeben sich die Sucheinträge für diese Datenbank, gekennzeichnet mit den Suchbegriff-IDs SD2, SD3 und SD4, wie folgt:

SD2 ("end of life" OR "eol") AND ("concept" OR "strategy" OR "option") AND ("wind") AND ("pricing" OR "cost" OR "financial performance")

SD3 ("environmental pricing")

SD4 ("monetization" OR "monetizing") AND ("environmental" OR "impact category" OR "impact categories") AND ("method" OR "methodology" OR "methodologies")

Tabelle 1 stellt das erste Blatt des Rechercheprotokolls dar, welches die Hauptforschungsfrage, die gegebenen initialen Suchschwerpunkte, die Suchbegriff-IDs, die verwendeten Suchbegriffe und deren Booleschen Operatoren der neun Recherchen beinhaltet. Zusätzlich sind die Kürzel der Datenbanken aufgeschlüsselt.

Hauptforschungsfrage		
Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen		
Gegebene initiale Suchschwerpunkte	Gewählte Suchbegriff-ID	Verwendete Suchbegriffe und Boolesche Operatoren (wie in Datenbank eingegeben)
1 Aktueller Stand der Forschung und Technik bezüglich realisierbarer EoL Optionen an WKA?	SC1	("end of life" OR "end-of-life" OR "eol") AND ("concept*" OR "strateg*" OR "option*" OR "method*" OR "model*") AND ("wind*") AND NOT ("window")
	SD1	("end of life" OR "end-of-life" OR "eol") AND ("strategy" OR "option" OR "method" OR "model") AND ("wind") NOT ("window")
2 Aktueller Stand der Forschung bezüglich möglicher Bepreisungsmethoden der ökologischen Umweltauswirkungen von EoL Optionen an WKA?	SC2	("end of life" OR "end-of-life" OR "eol") AND ("concept*" OR "strateg*" OR "option*" OR "method*" OR "model*") AND ("wind*") AND ("pricing" OR "cost estimation*" OR "cost predication*" OR "financial performance*")
	SD2	("end of life" OR "eol") AND ("concept" OR "strategy" OR "option") AND ("wind") AND ("pricing" OR "cost" OR "financial performance")
	GS2	("end of life" OR "end-of-life" OR "eol") AND ("concept*" OR "strateg*" OR "option*" OR "method*" OR "model*") AND ("wind*") AND ("pricing" OR "cost estimation*" OR "cost predication*" OR "financial performance*") AND ("ecological")
3 Aktueller Stand der Forschung bezüglich möglicher Bepreisungsmethoden von ökologischen Umweltauswirkungen	SC3	("environmental pricing")
	SD3	("environmental pricing")
4 Aktueller Stand der Forschung bezüglich möglicher Bepreisungsmethoden von ökologischen Umweltauswirkungen	SC4	("monetization" OR "monetizing") AND ("environmental" OR "impact categor*") AND ("method" OR "methodolog*")
	SD4	("monetization" OR "monetizing") AND ("environmental" OR "impact category" OR "impact categories") AND ("method" OR "methodology" OR "methodologies")
Name Datenbank		Kürzel Datenbank
Scopus		SC
ScienceDirect		SD
Google Scholar		GS

Tabelle 1: Rechercheprotokoll – erstes Blatt

Vierte Phase (Auswahl der Literatur)

Die Vorauswahl der Literatur wird, auf Grund des hohen Informationsgehalts des Titels und des Abstracts der gefundenen Literatur, durch Lesen dieser beiden Abschnitte durchgeführt. Anschließend wird die vorausgewählte Literatur vollständig oder kapitelspezifisch begutachtet und mit Hilfe von Ausschlusskriterien gefiltert.

Literaturen, auf welche nicht zugegriffen werden kann, werden generell ausgeschlossen. Ebenso werden Literaturen, welche nicht in Deutsch oder Englisch zur Verfügung stehen, ausgeschlossen. Da mehrere Literaturen zum gleichen Forschungsbereich eines selben Hauptautors als relevant erachtet wurden, diese sich

jedoch inhaltlich sehr stark überschneiden, werden die inhaltlichen Doppelungen dieser Literaturen ausgeschlossen. Eine mangelnde ökologische Betrachtung, sowie eine sehr detaillierte Prozessbeschreibung eines technischen Verfahrens werden ebenfalls als Ausschlusskriterien definiert.

Zusätzlich werden zu den bereits genannten Kriterien vier weitere Ausschlusskriterien für die FF1 definiert. Zum einen werden Literaturen mit einem Veröffentlichungsjahr vor 2010 ausgeschlossen, da deren Stand nicht mehr dem aktuellen Stand der Forschung und Technik entspricht. Zum anderen werden EoL Optionen der Phasen von R0 (Refuse) bis R2 (Reduce) ausgeschlossen, da sich diese Arbeit mit der Betrachtung von WKA, welche sich bereits am Ende ihres Produktlebenszyklus befinden, beschäftigt. Die Betrachtung von WKA impliziert, dass Literaturen mit keinem Bezug zu WKA ausgeschlossen werden. Ein weiteres Ausschlusskriterium ist der mangelnde Bezug zum Produktsystem WKA selbst, wenn es um die Kreislauffähigkeit von WKA-Herstellern geht.

Die für die Subforschungsfragen verwendeten Ausschlusskriterien werden in Tabelle 2 definiert.

Ausschlusskriterium	Relevant für Subforschungsfrage	
	FF1	FF2 und FF3
Kein Zugriff auf die Literatur	X	X
Sprache ungleich Deutsch und Englisch	X	X
Inhaltliche Doppelung mehrerer Literaturquellen derselben Autoren	X	X
Keine ökologische Betrachtung	X	X
Detaillierte Prozessbeschreibung eines technischen Verfahrens	X	X
Veröffentlichungsjahr der Literatur vor 2010	X	
Ausschließliche Betrachtung von R0 (Refuse) bis R2 (Reduce)	X	
Kein Bezug zu Windkraftanlagen	X	
Kreislauffähigkeit von Windkraftanlagen-Herstellern ohne Bezug auf das Produkt selbst	X	

Tabelle 2: Ausschlusskriterien für die Auswahl der Literatur der SLR

Fünfte Phase (Dokumentation der Recherche)

Die Dokumentation der SLR wird in Tabellen durchgeführt. Im ersten Blatt des Rechercheprotokolls, welches bereits in der dritten Phase (Suche der Literatur) in Tabelle 1 dargestellt wurde, sind die Hauptforschungsfrage, die gegebenen initialen Suchschwerpunkte, die Suchbegriff-IDs, die verwendeten Suchbegriffe inklusive deren

Boolschen Operatoren der neun Recherchen sowie die Aufschlüsselung der Kürzel der Datenbanken enthalten. Die Ergebnisse der durchgeführten Recherchen werden im folgenden Kapitel 3.1.3 ‚Durchführung der systematischen Literaturrecherche‘ dargestellt. Dort ist in Tabelle 3 das Datum der Suche, die Suchbegriff-ID, der Suchfilter, die Gesamtanzahl der angezeigten Treffer, die Anzahl der durchsuchten Treffer, die Anzahl der ausgewählten relevanten Literatur, die Anzahl an Überdeckungen mit vorheriger relevanter Literatur und die Anzahl der effektiv relevanten Literatur dokumentiert. Zusätzlich werden im Kapitel 13 ‚Anhang‘ in Tabelle 23 alle als relevant erachteten Literaturen der SLR, inklusive des Titels, der Autoren, des Veröffentlichungsjahres und der Literaturbewertung, welche im Kapitel 3.1.4 ‚Fazit und Ergebnis der systematischen Literaturrecherche‘ genauer erläutert wird, dargestellt.

3.1.3 Durchführung der systematischen Literaturrecherche

Die SLR wurde an drei Tagen, dem 01.12.2023, dem 19.12.2023 und 19.01.2024, durchgeführt.

Am 01.12.2023 wurden die Suchbegriff-IDs SC1 und SD1 verwendet, um die FF1 zu beantworten. Die Recherche mit der Suchbegriff-ID SC1 lieferte 282 angezeigte Treffer. Da diese Anzahl an Treffern zu hoch ist, um jedes einzelne Suchergebnis zu berücksichtigen, wurden nur die ersten 100 Ergebnisse beachtet. Unter Berücksichtigung aller 100 Titel und 77 Abstracts, wurden 45 Literaturen als relevant erachtet. Von den als relevant erachteten Literaturen konnte jedoch nur auf 40 Titel zugegriffen werden. 5 Literaturen konnten nicht in Form einer PDF-Datei oder ähnlichem erlangt werden. Die Recherche mit der Suchbegriff-ID SD1 lieferte 87 angezeigte Treffer, wovon unter Berücksichtigung aller 87 Titel und 58 Abstracts eine Anzahl von 29 Literaturen als relevant erachtet wurden. Von den als relevant erachteten Literaturen überdeckten sich 14 Literaturen mit den Ergebnissen der vorangegangenen Recherche. Somit wurden nur 15 neue Literaturen als relevant erachtet, welche alle in Form einer PDF-Datei erlangt werden konnten.

Am 19.12.2023 wurden die Suchbegriff-IDs SC2, SD2, GS2, SC3 und SD3 verwendet, um die FF2 und FF3 zu beantworten. Zu Beginn wurde die Recherche mit den Suchbegriff-IDs SC2 und SD2 durchgeführt, welche eine Anzahl von 3, beziehungsweise 16, Treffern anzeigte. Alle angezeigten Titel und Abstracts wurden berücksichtigt, wovon 1, beziehungsweise 4, Literaturen als relevant erachtet wurden. Die insgesamt 5 relevanten Literaturen überdeckten sich jedoch alle mit bereits relevanten Literaturen aus der Recherche SC1 und SD1. Da die Anzahl der Ergebnisse sehr gering war, wurde zusätzlich eine Recherche mit der Suchbegriff-ID GS2 durchgeführt. Diese Recherche lieferte 4.300 angezeigte Treffer. Da diese Anzahl an Treffern zu hoch ist, um jedes einzelne Suchergebnis zu berücksichtigen, wurden

nur die ersten 50 Ergebnisse beachtet. Unter Berücksichtigung aller 50 Titel und 12 Abstracts, wurden 5 Literaturen als relevant erachtet. Von den als relevant erachteten Literaturen konnte jedoch nur auf 4 Titel zugegriffen werden. 1 Literatur konnten nicht in Form einer PDF-Datei oder ähnlichem erlangt werden. Auf Grund der geringen Anzahl relevanter Literaturen zur Beantwortung der FF2 und FF3 wurde der dritte Suchschwerpunkt entwickelt. Somit wurde eine weitere Recherche mit den Suchbegriff-IDs SC3 und SD3 durchgeführt. Diese Recherche lieferte 24, beziehungsweise 27, angezeigte Treffer, wovon alle beachtet wurden. Unter Berücksichtigung von 10, beziehungsweise 10, Abstracts, wurden 4, beziehungsweise 3, Literaturen als relevant erachtet. Von den als relevant erachteten Literaturen überdeckten sich 0, beziehungsweise 3, Literaturen mit den Ergebnissen der vorangegangenen Recherchen. Somit wurden nur 4 neue Literaturen als relevant erachtet, welche alle in Form einer PDF-Datei erlangt werden konnten.

Am 19.01.2024 wurden die Suchbegriff-IDs SC4 und SD4 verwendet, um die FF2 und FF3 umfänglicher zu beantworten. Die Recherche mit der Suchbegriff-ID SC4 lieferte 238 angezeigte Treffer. Da diese Anzahl an Treffern zu hoch ist, um jedes einzelne Suchergebnis zu berücksichtigen, wurden nur die ersten 50 Ergebnisse beachtet. Unter Berücksichtigung aller 50 Titel und 28 Abstracts, wurden 7 Literaturen als relevant erachtet. Von den als relevant erachteten Literaturen überdeckte sich 1 Literatur mit den Ergebnissen der vorangegangenen Recherchen. Somit wurden nur 6 neue Literaturen als relevant erachtet, welche alle in Form einer PDF-Datei erlangt werden konnten. Die Recherche mit der Suchbegriff-ID SD4 lieferte 105 angezeigte Treffer, wovon unter Berücksichtigung der ersten 50 Titel und 16 Abstracts eine Anzahl von 5 Literaturen als relevant erachtet wurden. Von den als relevant erachteten Literaturen überdeckten sich 3 Literaturen mit den Ergebnissen der vorangegangenen Recherchen. Somit wurden nur 2 neue Literaturen als relevant erachtet, welche alle in Form einer PDF-Datei erlangt werden konnten.

In Summe wurden von den 5.082 angezeigten Treffern 407 Stück durchsucht. Ohne die sich überdeckenden und nicht verfügbaren Literaturen, ergeben sich 71 effektiv als relevant erachtete Literaturen aus der SLR. Da jedoch 13 Literaturen sowohl für die FF1 als auch für die FF2 und FF3 für relevant erachtet wurden, wurden diese doppelt gezählt. Grund dafür ist die unterschiedliche Bewertung der Bewertungskategorie Verwertbarkeit, des im folgenden Kapitel 3.1.4 ‚Fazit und Ergebnis der systematischen Literaturrecherche‘ erläuterten Bewertungssystems.

Zusätzlich zur SLR wurde die Backward-and-Forward (BaF) Methode, angelehnt an Webster und Watson (2002) verwendet. Durch die Überprüfung der Quellen der Literaturen aus der SLR lassen sich weitere relevante Literaturen ausfindig machen (Backward). Ebenfalls lassen sich Literaturen überprüfen, welche die Literaturen der SLR als Quelle verwenden (Forward) (Webster & Watson, 2002, S. 16). Mit dieser

Methode konnte eine weitere relevante Literatur zur Beantwortung der FF2 und FF3 identifiziert werden.

In Summe ergibt sich somit eine Gesamtanzahl der effektiv relevanten Literaturen von 85 Stück.

In Tabelle 3 werden die wichtigsten Daten der neun durchgeführten Recherchen der SLR dargestellt.

Datum der Suche	Suchbegriff-ID	Gesetzte Suchfilter	Gesamtanzahl angezeigter Treffer	Anzahl durchsuchter Treffer	Auswahl relevanter Literatur (mit Zugriff)	Anzahl Überdeckungen mit vorheriger relevanter Literatur	Anzahl effektiv relevanter Literatur
01.12.23	SC1	beliebige Sprache, Article title, Abstract, Keywords	282	100	40		40
	SD1		87	87	29	14	15
19.12.23	SC2	beliebige Sprache, Article title, Abstract, Keywords, whole Article	3	3	1	1	0
	SD2		16	16	4	4	0
	GS2	4.300	50	4	0	4	
	SC3	beliebige Sprache, Article title, Abstract, Keywords, whole Article	24	24	4	0	4
	SD3	27	27	3	3	0	
19.01.24	SC4	beliebige Sprache, Article title, Abstract, Keywords	238	50	7	1	6
	SD4		105	50	5	3	2
			Σ 5.082	Σ 407			Σ 71
					Doppelung FF1 und FF2/FF3		13
							Σ 84

Tabelle 3: Zusammenfassung der Daten der Durchführung der SLR

In Tabelle 4 wird die Gesamtanzahl der effektiv relevanten Literaturen der beiden Methoden dargestellt.

Methode	Anzahl effektiv relevanter Literatur
SLR	84
Backward-and-Forward	1
	Σ 85

Tabelle 4: Gesamtanzahl der effektiv relevanten Literaturen beider Methoden

3.1.4 Fazit und Ergebnis der systematischen Literaturrecherche

In Summe wurden 407 Literaturen im Rahmen der SLR in drei Datenbanken betrachtet. Davon wurde, inklusive der Literatur aus der BaF Methode, eine Anzahl an 85 Literaturen als relevant erachtet. Die Wahl der Suchbegriffe, Suchfilter und Datenbanken ergab zufriedenstellende Ergebnisse, welche für die umfängliche und objektive Beantwortung der Subforschungsfragen relevant sind.

Um die Ergebnisse der SLR qualitativ bewerten zu können, wurde die als relevant erachtete Literatur aus Kapitel 3.1.3 ‚Durchführung der systematischen Literaturrecherche‘ mit einem Bewertungssystem vom Autor dieser Arbeit bewertet.

Die Bewertungskategorien dieses Bewertungssystems lehnen sich an das dritte Kapitel ‚3 Kriterienkatalog: Qualitative Wahrnehmung wissenschaftlicher Publikationen‘ der Literatur ‚Kriterien der qualitativen Bewertung wissenschaftlicher Publikationen‘ von Herb und Geith (2020) an. Die Bewertungskategorien Transparenz, Design, Generalisierbarkeit, Originalität und Verwertbarkeit des Bewertungssystems lehnen sich an einzelne Kriterien der Unterkapitel ‚2. Inhaltliche Kriterien‘ und ‚3. Präsentation des Inhaltes‘ des dritten Kapitels von Herb und Geith (2020) an. Da die FF1, FF2 und FF3 anhand der Inhalte der als relevant erachteten Literatur beantwortet werden, werden die eben genannten Bewertungskategorien verwendet. Externe Bewertungskategorien, wie aus Unterkapitel ‚1. Externe Kriterien‘ des dritten Kapitels von Herb und Geith (2020), werden deshalb nicht berücksichtigt. Die Bewertungskategorie Vielseitigkeit des Bewertungssystems dient als Erweiterung und Individualisierung des Kriterienkatalogs von Herb und Geith (2020) und wird vom Autor dieser Arbeit selbst definiert.

Um die Qualität der einzelnen Bewertungskategorien quantifizieren zu können, wird eine eindimensionale intervallskalierte endpunktbenannte Skala, angelehnt an Kapitel ‚6.1.3 Intervall-Skalen‘ von Porst (2009), verwendet. Diese Skala ermöglicht durch den identischen Abstand zwischen den einzelnen Skalenpunkten die Anwendung verschiedener Auswertungsverfahren, wie dem eines Mittelwerts (Porst, 2009, S. 80). Auf Grund einer endpunktbenannten Skala sind nur die beiden extremen Skalenpunkte verbalisiert, wodurch sich eine komplexe Verbalisierung der restlichen Skalenpunkte erübrigt (Porst, 2009, S. 77&80). Da die zu bewertende Literatur bereits durch die SLR, in Bezug auf die Subforschungsfragen dieser Arbeit, gefiltert wurde, ist die Skala eindimensional. Somit ermöglicht die Skala der bewertenden Person nur den Grad ihrer Zustimmung auszudrücken (Porst, 2009, S. 90). Zusätzlich besitzen die Skalenpunkte, der in dieser Arbeit verwendeten Skala, eine Rangordnung und reichen von 1 Punkt (nicht genügend, sehr gering, isoliert) bis 5 Punkte (sehr gut, sehr hoch, umfassend) (Porst, 2009, S. 72).

Durch Aufsummieren der Punktezahle jeder einzelnen Bewertungskategorie einer bewerteten Literatur ergibt sich eine Gesamtpunktzahl, welche einen Maximalwert von 30 Punkten erreichen kann. Diese Gesamtpunktzahl spiegelt die Qualität des Inhalts der jeweiligen Literatur, bezogen auf die einzelnen Bewertungskategorien, wider. Hierbei entspricht eine hohe Gesamtpunktzahl einer qualitativ hochwertigen Literatur, wohingegen eine geringe Gesamtpunktzahl einer qualitativ minderwertigen Literatur entspricht.

Die sechs Bewertungskategorien Transparenz, Design, Vielseitigkeit, Generalisierbarkeit, Originalität und Verwertbarkeit werden wie folgt definiert:

Transparenz: Transparenz und Darstellung der Methodik und deren Vorgehensweise (angelehnt an Herb und Geith (2020, S. 80-81))

Design: Qualität und Angemessenheit des Designs der Literatur (angelehnt an Herb und Geith (2020, S. 80))

Vielseitigkeit: Vielseitigkeit der berücksichtigten EoL Optionen

Generalisierbarkeit: Systemunabhängige Anwendbarkeit der Methodik und deren Vorgehensweise (angelehnt an Herb und Geith (2020, S. 81))

Originalität: Grad der Originalität der Methodik und Vorgehensweise (angelehnt an Herb und Geith (2020, S. 80))

Verwertbarkeit: Grad der inhaltlichen Verwertbarkeit bezüglich der Subforschungsfrage (angelehnt an Herb und Geith (2020, S. 81))

Nachdem alle 85 relevanten Literaturen, in Bezug auf die FF1, FF2 und FF3, vollständig analysiert wurden, wurden diese mit Hilfe des Bewertungssystems vom Autor dieser Arbeit bewertet. Abbildung 8 stellt die Verteilung der Gesamtpunktzahl der bewerteten Literatur der FF1 dar, während Abbildung 9 die Verteilung der Gesamtpunktzahl der bewerteten Literatur der FF2 und FF3, inklusive der BaF Methode, darstellt.

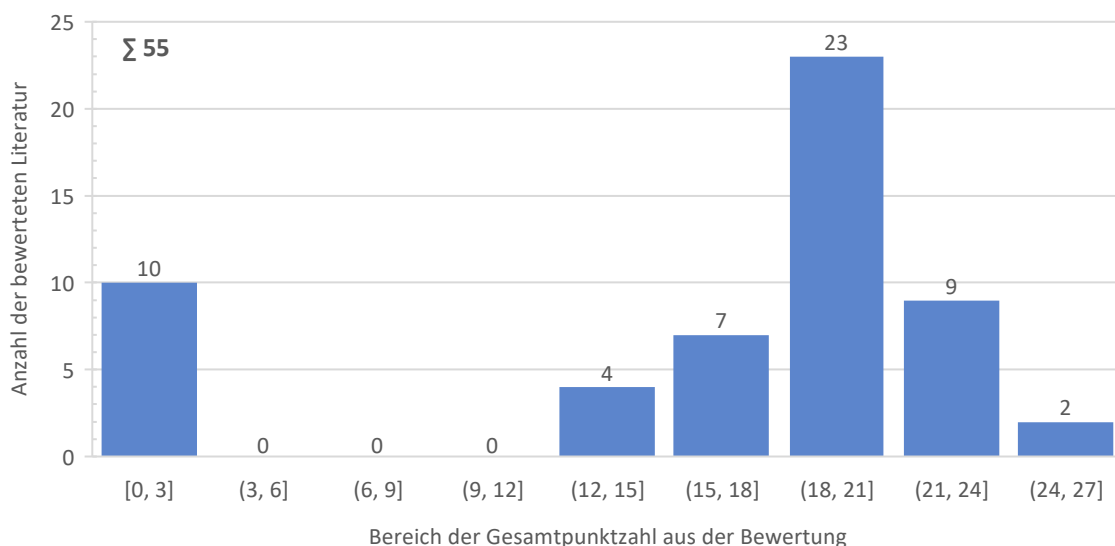


Abbildung 8: Verteilung der Gesamtpunktzahl der bewerteten Literatur der FF1

Es ist in Abbildung 8 zu erkennen, dass 10 Literaturen eine Gesamtpunktzahl von null Punkten erhalten haben. Diese Literaturen besitzen einen zu geringen Informationsgehalt, bezogen auf die in dieser Arbeit gestellte FF1. Aus diesem Grund

wurden diese Literaturen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt und mit der Gesamtpunktzahl von null Punkten bewertet. 76% der berücksichtigten Literatur der FF1 haben eine Gesamtpunktzahl von über 18 Punkten, was für die Qualität der in dieser Arbeit berücksichtigten Literatur spricht.

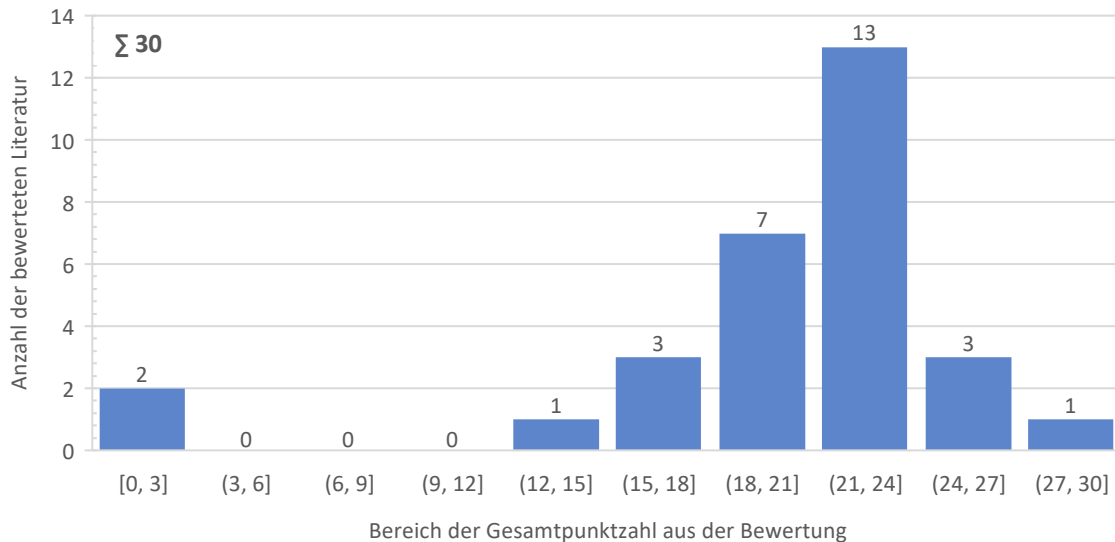


Abbildung 9: Verteilung der Gesamtpunktzahl der bewerteten Literatur der FF2, FF3 und Backward-and-Forward Methode

Es ist in Abbildung 9 zu erkennen, dass 2 Literaturen eine Gesamtpunktzahl von null Punkten erhalten haben. Diese Literaturen besitzen einen zu geringen Informationsgehalt, bezogen auf die in dieser Arbeit gestellte FF2 und FF3. Aus diesem Grund wurden diese Literaturen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt und mit der Gesamtpunktzahl von null Punkten bewertet. 80% der berücksichtigten Literatur der FF2 und FF3 haben eine Gesamtpunktzahl von über 18 Punkten, was erneut für die Qualität der in dieser Arbeit berücksichtigten Literatur spricht.

In Abbildung 10 wird das Publikationsjahr aller bewerteten Literaturen, inklusive der kumulierten Anzahl der Veröffentlichungen der vorherigen Jahre im Zeitraum von <2014 bis 2023, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Interesse an diesem Forschungsschwerpunkt in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen hat, beginnend mit dem Jahr 2019. Bis ins Jahr 2022 stieg die Anzahl der veröffentlichten Publikationen zu diesem Forschungsschwerpunkt stetig. Im Jahr 2023 wurden zum ersten Mal im Vergleich zum jeweiligen Vorjahr gleichviele Publikationen veröffentlicht. Da die SLR im Dezember 2023 und Januar 2024 durchgeführt wurde, lässt sich die Anzahl an Veröffentlichungen im Jahr 2023 als nahezu vollständig ansehen und somit ohne weitere Berücksichtigung direkt mit den vorherigen Jahren vergleichen.

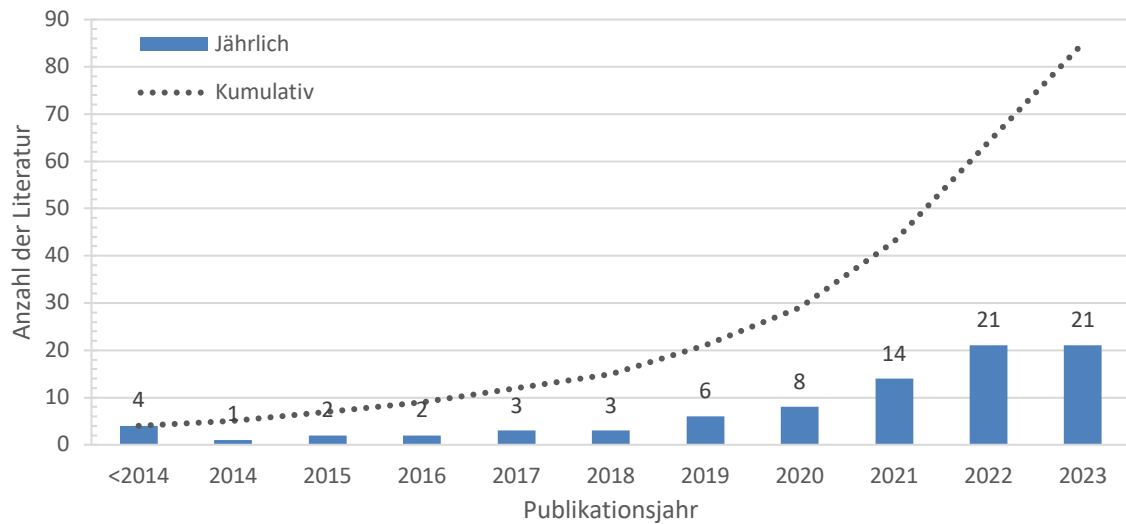


Abbildung 10: Jährliche und kumulative Darstellung der Veröffentlichungsjahre der bewerteten Literatur

Abbildung 11 stellt die Anzahl der Veröffentlichungen und Zitierungen der bewerteten Literatur in Bezug zum jeweiligen Land dar. Es ist zu erkennen, dass der Großteil der Literatur in den USA und im Vereinigten Königreich (engl. United Kingdom (UK)) veröffentlicht wurde. Über die Hälfte der Literatur wurden in den USA, UK, China, Dänemark und Deutschland veröffentlicht. In Bezug auf die Summe der Zitierungen aller, in einem Land veröffentlichten, Literaturen, ist zu erkennen, dass die Literatur aus UK, Niederlande und Tschechien die höchsten Werte aufweist. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sind die Datenwerte, welche für die Erstellung der Abbildung 11 verwendet werden, in Tabelle 24 im Kapitel 13 ‚Anhang‘ aufgeführt.

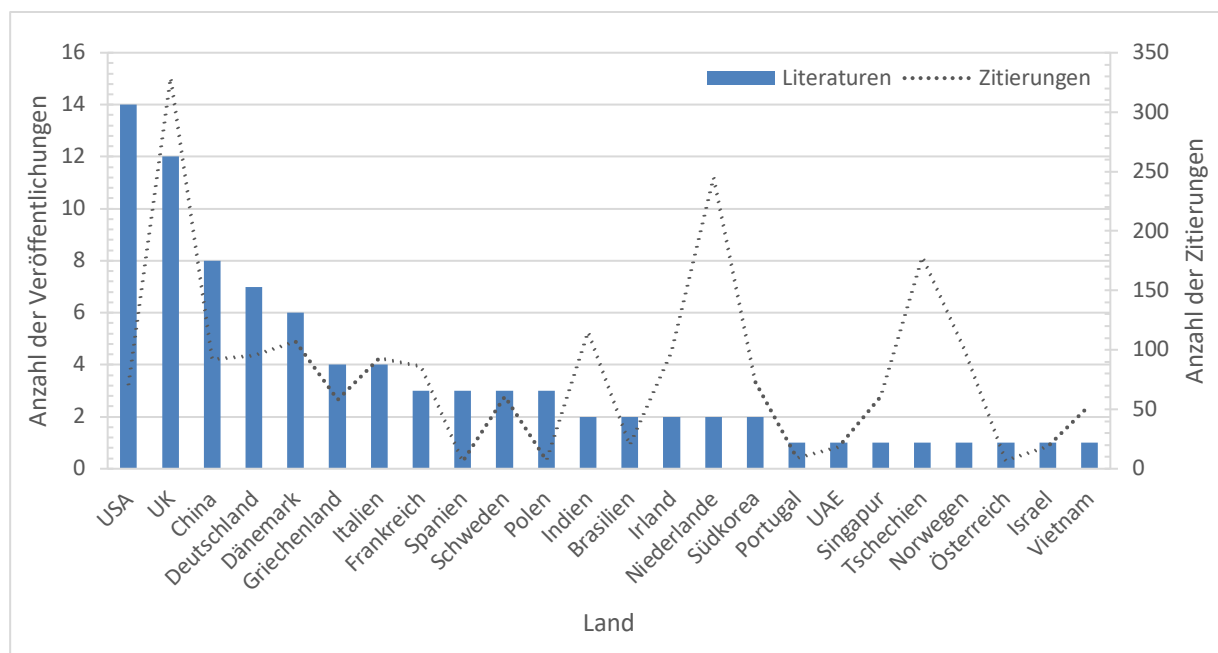


Abbildung 11: Anzahl der Veröffentlichungen und Zitierungen der bewerteten Literatur nach Land

3.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche bezogen auf die Subforschungsfragen

In diesem Kapitel werden die Subforschungsfragen FF1, FF2 und FF3 anhand der Ergebnisse der SLR nacheinander beantwortet.

3.2.1 Beantwortung der Subforschungsfrage FF1

In diesem Unterkapitel wird die FF1 - „**Was ist der aktuelle Stand der Forschung und Technik bezüglich realisierbarer End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen?**“ - anhand der Ergebnisse der SLR beantwortet.

In der untersuchten Literatur existieren zwei zu unterscheidende Ansätze für mögliche EoL Optionen an einer WKA. Zum einen wird die WKA als ein gesamtes System betrachtet und zum anderen werden die einzelnen Komponenten und Materialien der WKA betrachtet.

Bei der Betrachtung einer WKA als ein gesamtes System verwenden beispielsweise Kasner (2022) und Leite et al. (2022) die drei möglichen EoL Optionen Stilllegung (engl. decommissioning), Lebensdauererweiterung (engl. life extension) und Erneuerung (engl. repowering). Bei einer Stilllegung wird die gesamte WKA demontiert. Zusätzlich wird eine Renaturierung durchgeführt, welche die zugehörige Infrastruktur der WKA einschließt (Kasner, 2022, S. 2; Leite et al., 2022, S. 3). Bei einer Lebensdauererweiterung wird die Lebensdauer der WKA durch die Modernisierung einzelner Bauteile um mehrere Jahre verlängert. Die Modernisierung bezieht sich meist auf Bauteile wie die Rotorblätter, die Gondel oder elektrische und elektronische Komponenten, welche mit neuen Bauteilen des ursprünglichen Typs ersetzt werden (Kasner, 2022, S. 2; Leite et al., 2022, S. 3; Ramírez et al., 2022, S. 7). Bei einer Erneuerung wird die ursprüngliche WKA durch eine WKA eines neueren und effizienteren Typs ausgetauscht. Somit steigen die Kapazität und Effizienz der Anlage (Kasner, 2022, S. 2; Leite et al., 2022, S. 3).

Zur Evaluierung der besten EoL Option einer WKA werden verschiedenste Methoden verwendet. So nutzen beispielsweise Kasner (2022), Gennitsaris et al. (2023) und Zhong et al. (2011) die Methode der Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment (LCA)), welche unter anderem die EoL Optionen der einzelnen Komponenten und Materialien betrachtet. Bei der Betrachtung von EoL Optionen der einzelnen Komponenten und Materialien einer WKA ist aus den Literaturquellen der SLR zu erkennen, dass sich die aktuelle Forschung stark mit dem Ende des Produktlebenszyklus der Rotorblätter befasst. Grund dafür ist deren Größe, komplexe materielle Zusammensetzung, komplexe Handhabung der Materialien im EoL Szenario und geringer materieller Wert (Zhang et al., 2023, S. 4). Rotorblätter von WKA bestehen aus einer komplexen Kombination von Materialien wie

glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK), Balsaholz, Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylenterephthalat (PET), Polyurethan (PUR) und Stahl. Mit einem Gewichtsanteil von 80% bis 90% machen die Verbundwerkstoffe (GFK oder CFK) den Großteil der Rotorblätter aus (Kasner, 2022, S. 8; Paulsen & Enevoldsen, 2021, S. 2; Zhang et al., 2023, S. 4). Nach aktuellem Stand der Forschung und Technik lassen sich die EoL Optionen Reuse, Repurpose, Recycle, Recover und Deponierung für Rotorblätter umsetzen (Zhang et al., 2023, S. 5-6).

Unter Reuse wird die Wiederverwendung der Rotorblätter an anderen WKA verstanden, ohne ihre Form und Funktion zu verändern (Rathore & Panwar, 2023, S. 748; Zhang et al., 2023, S. 6). In der Regel werden diese unbeschädigten Rotorblätter in weniger reifen Märkten wie Lateinamerika, Afrika, Indien und Ost-Europa verkauft (Delaney et al., 2023, S. 3). Unter Repurpose werden Teile der ursprünglichen Rotorblätter in neuen Produkten weiterverwendet, jedoch nicht im Bereich der ursprünglichen Erzeugung von Elektrizität (Zhang et al., 2023, S. 6). So stellt beispielsweise André et al. (2022) ein Konzeptentwurf für Fußgängerbrücken vor, welches Elemente der Rotorblätter als tragende Komponenten nutzt. Weitere Konzepte realisieren Spielplätze, Telefonmasten, öffentliche Überdachungen oder ganze Dächer (Chikha et al., 2022, S. 2; Rathore & Panwar, 2023, S. 749; Zhang et al., 2023, S. 5).

Für die EoL Option Recycle existieren aktuell drei grundsätzliche Verfahren: mechanisch, thermisch und chemisch (Zhang et al., 2023, S. 6).

Beim mechanischen Recycling werden die Rotorblätter zu Beginn in kleinere Stücke zerschnitten und anschließend in einem Schredder zu Pulver zerkleinert. In diesem Pulver sind Harzpulver und Fasern mit einer Faserlänge von 0,1mm bis 0,25mm enthalten. Zur Gewinnung der recycelten Fasern wird ein Sieb mit einem Lochdurchmesser von 0,1mm genutzt, um diese von den restlichen Materialien zu trennen. Die durch das mechanische Recycling gewonnenen Fasern und Pulver werden durch ihre verminderte Festigkeit häufig als Füllstoffe in neuen Verbundwerkstoffen wie Beton, Asphalt oder Beschichtungen eingesetzt (Rathore & Panwar, 2023, S. 749; Zhang et al., 2023, S. 6-7). Erste Studien zeigen zusätzlich, dass in der Zementherstellung bis zu 10% der Rohmaterialien durch Abfall von Rotorblätter substituiert werden kann (Paulsen & Enevoldsen, 2021, S. 5).

Beim thermischen Recycling werden die Verbundwerkstoffe hohen Temperaturen ausgesetzt, wodurch die Polymerverbindungen aufbrechen und organische Gase und Flüssigkeiten freigesetzt werden, während die Fasern erhalten bleiben. Nach aktuellem Stand der Technik sind die Methoden der Pyrolyse, Wirbelschichtpyrolyse und Mikrowellenpyrolyse realisierbar (Rathore & Panwar, 2023, S. 750; Zhang et al., 2023, S. 7). Bei der Pyrolyse wird das zu trennende Material unter kontrollierten

Bedingungen und ohne Sauerstoff auf 450°C bis 700°C erhitzt, wobei die organischen Materialien wie Harze aufgespalten werden und die anorganischen Materialien wie Fasern und Füllstoffe für die Rückgewinnung intakt bleiben (Paulsen & Enevoldsen, 2021, S. 5; Zhang et al., 2023, S. 7). Bei der Wirbelschichtpyrolyse wird ein Heißluftstrom von 450°C bis 550°C unter zusätzlicher Verwendung von Quarzsand für die Auftrennung des Verbundwerkstoffs genutzt (Rathore & Panwar, 2023, S. 750; Zhang et al., 2023, S. 8). Bei der Mikrowellenpyrolyse wird das zu trennende Material in einer Stickstoffkammer mit Hilfe von Mikrowellen auf eine Temperatur zwischen 300°C und 600°C erhitzt (Paulsen & Enevoldsen, 2021, S. 5; Rathore & Panwar, 2023, S. 750). Trotz der hohen Festigkeit der recycelten Fasern zwischen 70% bis 95% ist die Methode des thermischen Recyclings in Bezug auf die anderen Recyclingmethoden kostenintensiv, benötigt viel Energie und setzt schädliche Gase frei (Zhang et al., 2023, S. 9).

Beim chemischen Recycling wird ein Lösungsmittel in Verbindung mit Temperatur und Druck verwendet, um die Verbindung zwischen Harz und Fasern aufzubrechen. Als Lösungsmittel wird Wasser, Alkohol oder Säure verwendet (Zhang et al., 2023, S. 9). Eine der häufigsten Methoden ist die Solvolyse, welche entweder unter hohem Druck und Temperatur (>200°C) oder niedrigem Druck und Temperatur (<200°C) durchgeführt werden kann. Die Wahl des Lösungsmittels, Temperatur und Drucks hängt jedoch von der Zusammensetzung des zu recycelten Verbundwerkstoffs ab. Chemisches Recycling ist im Vergleich zum mechanischen und thermischen Recycling deutlich gefährlicher, da potenziell gefährliche Stoffe verwendet werden, die die Umwelt schädigen könnten. Der Prozess findet zusätzlich unter gefährlichen Bedingungen, hohen Temperaturen und möglicherweise hohem Druck statt (Paulsen & Enevoldsen, 2021, S. 6). Neben der Solvolyse kann auch die Methode der Hochspannungszerkleinerung (engl. High Voltage Fragmentation (HVF)) verwendet werden, bei der unter Anwendung von elektrischen Impulsen die Trennung der Fasern vom Harz erfolgt (Sommer et al., 2022, S. 13).

In Bezug auf den Technologiereifegrad der einzelnen Recyclingmethoden ist zu erkennen, dass das mechanische Recycling bereits sehr weit entwickelt ist. Das Verfahren der Pyrolyse hat einen mittleren Technologiereifegrad, wohingegen das Verfahren der Mikrowellenpyrolyse, der Wirbelschichtpyrolyse und der Solvolyse einen geringen Grad besitzen (Paulsen & Enevoldsen, 2021, S. 7; Rathore & Panwar, 2023, S. 754). Anhand des Technologiereifegrads und des voraussichtlichen Investments zur Realisierung eines tragfähigen Prozesses der Methode, wird das mechanische Recycling derzeit als die vorteilhafteste Methode angesehen, da sie im kommerziellen Maßstab eingesetzt werden kann (Paulsen & Enevoldsen, 2021, S. 7-8).

Unter der EoL Option Recover wird die Nutzung der Energie aus der Verbrennung der organischen Bestandteile der Rotorblätter verstanden (Zhang et al., 2023, S. 6).

Jedoch ist die Rückgewinnung von Energie durch den hohen Anteil an Glasfasern schwierig, da die Glasfasern nicht brennbar sind. Zusätzlich fallen durch die Verbrennung Rückstände wie Flugasche an, die nachträglich weiterverwendet oder entsorgt werden müssen (Rathore & Panwar, 2023, S. 749). Derzeit ist die Deponierung die vorherrschende Methode zur Entsorgung von Rotorblätter von WKA, obwohl sie als die am wenigsten wünschenswerte Option im Hinblick auf die Grundsätze der Kreislaufwirtschaft und des Umweltschutzes angesehen wird (Paulsen & Enevoldsen, 2021, S. 1; Zhang et al., 2023, S. 6). Aktuell werden bis zu 85% der Rotorblätter, welche am Ende ihres Produktlebenszyklus stehen, auf Deponien entsorgt (Zhang et al., 2023, S. 2).

Neben den eben beschriebenen EoL Optionen der Rotorblätter gibt es weitere EoL Optionen für andere Bauteile und Materialien einer WKA. Grundsätzlich lässt sich eine WKA in sechs grobe Komponenten aufteilen – dem Fundament, dem Turm, der Gondel, den Rotorblättern, dem Transformator und dem elektronischen System mit Verkabelung (Scherhauser et al., 2020, S. 41&42). Das Fundament besteht meist aus Beton und Stahl, wofür es mehrere EoL Optionen gibt (Cinar & Yildirim, 2017, S. 241; Kasner, 2022, S. 8-9). Gennitsaris et al. (2023) nennt drei mögliche Optionen. Das Fundament wird vor Ort zurückgelassen und nicht weiter verwertet, es wird abgetragen und auf einer Deponie entsorgt oder es wird recycelt und wiederverwendet, wodurch primäre Rohstoffe substituiert werden können (Gennitsaris et al., 2023, S. 2). Der Turm einer WKA besteht größtenteils aus Stahl, gefolgt von Aluminium und Kupfer (Cinar & Yildirim, 2017, S. 241; Kasner, 2022, S. 8). Da diese Metalle eine hohe Recyclingfähigkeit aufweisen, wird sehr häufig die EoL Option Recycle verwendet. Ein Anteil von bis zu 90% der Türme lässt sich somit recyceln (Zhang et al., 2023, S. 4). Die Gondel besteht zum größten Teil aus Stahl und Gusseisen, wodurch auch in diesem Fall die EoL Option Recycle häufig verwendet wird. Zusätzlich enthält die Gondel Kupfer und Aluminium, was sich ebenfalls zu einem hohen Anteil recyceln lässt (Cinar & Yildirim, 2017, S. 241; Kasner, 2022, S. 8). Der Transformator und das elektronische System mit Verkabelung bestehen zum Großteil aus Eisen und Kupfer, weswegen auch in diesem Fall die EoL Option Recycling häufig verwendet wird (Scherhauser et al., 2020, S. 42).

Bei der Betrachtung einer gesamten WKA ohne die Rotorblätter ist zu erkennen, dass die EoL Option Recycle sehr dominant ausgeübt wird, da die Recyclingquote der WKA bei 80% bis 90% liegt (Delaney et al., 2023, S. 1-2; Gennitsaris et al., 2023, S. 2; Mello et al., 2022, S. 37). Grund dafür ist der hohe Anteil an Materialien wie Stahl, Kupfer oder Aluminium, welche eine Recyclingquote von bis zu 90% aufweisen, sowie die bereits etablierten Recyclingverfahren für diese Materialien (Zhang et al., 2023, S. 4).

Es lässt sich zusammenfassen, dass sich aktuelle Forschungsarbeiten sehr stark mit möglichen EoL Optionen für Verbundwerkstoffe der Rotorblätter befassen. Grund

dafür ist zum einen die aktuell sehr geringe Zirkularität dieser Verbundwerkstoffe sowie zum anderen die bereits etablierten und stärker erforschten EoL Optionen der restlichen Materialien einer WKA wie Stahl, Kupfer oder Aluminium. Außerdem lässt sich erkennen, dass die EoL Option Recycle am häufigsten betrachtet wird.

3.2.2 Beantwortung der Subforschungsfrage FF2

Im diesem Unterkapitel wird die FF2 - „**Was ist der aktuelle Stand der Forschung bezüglich möglicher Bepreisungsmethoden der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen?**“ - anhand der Ergebnisse der SLR und der BaF Methode beantwortet.

Zu Beginn ist anzumerken, dass alle als relevant erachteten Literaturen in einer gewissen Art und Weise eine Quantifizierung der ökologischen Umweltauswirkungen vornehmen, welche als Basis der späteren Bepreisung dient. Die Methode der Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment (LCA)), welches das Life Cycle Inventory (LCI) und das Life Cycle Impact Assessment (LCIA) beinhaltet, wird von einem Großteil der berücksichtigten Literatur verwendet, um diese Quantifizierung durchzuführen. Jedoch bringt keine der als relevant erachteten Literaturen die quantifizierten ökologischen Umweltauswirkungen, in Bezug auf WKA, in einen monetären Kontext. Aus diesem Grund wurden die zusätzlichen Recherchen (SC3, SD3, SC4 und SD4) durchgeführt, um Bepreisungsmethoden von ökologischen Umweltauswirkungen, unabhängig von WKA, zu identifizieren und darzustellen.

Zum besseren Verständnis der Vorgehensweise wird zu Beginn die Quantifizierung der ökologischen Umweltauswirkungen, mit Bezug auf WKA, erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse der zusätzlichen Recherchen (SC3, SD3, SC4 und SD4) präsentiert und auf deren Bepreisungsmethoden eingegangen, welche jedoch keinen Bezug zu WKA aufweisen. Abschließend werden die Systemgrenzen der berücksichtigten Bepreisungsmethoden identifiziert und dargestellt.

Ein Großteil der für diese Subforschungsfrage als relevant erachteten Literaturen nutzt das LCA. Ziel dieser Methode ist die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, S. 9). Diese Literaturen beschränken sich dabei jedoch nicht nur auf die Betrachtung der EoL Phase des untersuchten Produktsystems, sondern berücksichtigen weitere Produktlebensphasen wie beispielsweise Herstellung oder Nutzung. Für die Beantwortung der FF2 und FF3 wird primär die EoL Phase des Produktsystems berücksichtigt. Lassen sich jedoch Modelle und Methoden in anderen Produktlebensphasen identifizieren, welche sich auf die EoL Phase adaptieren lassen könnten, werden diese ebenfalls berücksichtigt.

Für die Erstellung eines Flussmodells des Produktsystems, welches die verschiedenen Vorgänge innerhalb der Systemgrenzen veranschaulicht, nutzen beispielsweise Sommer et al. (2022, S. 2) und Gennitsaris et al. (2023, S. 4) die Methode des Life Cycle Inventory (LCI). Das LCI bezeichnet die entsprechenden Inputs und Outputs eines Produktsystems, welches die Ströme aus der und in die Umwelt umfasst (Mohan, 2018, S. 456). In Abhängigkeit der Systemgrenzen variiert die Art der Daten der Inputs und Outputs. So definiert beispielsweise Cong et al. (2023, S. 3) unter anderem die Massenverhältnisse der Materialien der Rotorblätter des Typs LM 37.3P2, wohingegen Nagle et al. (2020, S. 5) den Gesamtenergieverbrauch, des zur Zerkleinerung der Rotorblätter benötigten Schredders, definiert. Zur Ermittlung dieser spezifischen Daten können unterschiedliche Methoden angewendet werden. So nutzt beispielsweise Gennitsaris et al. (2023, S. 4) Daten aus der Datenbank SimaPro PhD 9.4 Ecoinvent 3.9.

Um eine Bewertung und Charakterisierung der verschiedenen Umweltauswirkungen für die Ergebnisse des LCI, und somit des zu analysierenden Produkts und dessen Prozesse zu erhalten, verwendet beispielsweise Gennitsaris et al. (2023, S. 4) die Methode des Life Cycle Impact Assessments (LCIA) (Mohan, 2018, S. 456; Nagle et al., 2020, S. 6). Für die Folgenabschätzung gibt es mehrere Methoden wie beispielsweise das Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts (TRACI) oder den Ecoindicator, welche unterschiedliche Wirkungskategorien berücksichtigen (Mohan, 2018, S. 456). Wirkungskategorien sind Klassen, die wichtige Umweltthemen repräsentieren und denen Ergebnisse des LCI zugeordnet werden können (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, S. 14). In der betrachteten Literatur verwendet beispielsweise Sommer et al. (2022) die IPCC 2013 GWP 100a Methode, Nagle et al. (2020) die IMPACT2002+ Methode und Gennitsaris et al. (2023) die IMPACT World + Midpoint Methode. Für die jeweiligen Wirkungskategorien werden somit spezifische Werte ermittelt, welche anschließend bewertet werden können. In Bezug auf die Wirkungskategorien sind Climate Change in kgCO_2eq , Land Use in m^2 , Eutrophication in kgPO_4eq oder Acidification in kgSO_2eq konkrete Beispiele, welche beispielsweise in den Arbeiten von Gennitsaris et al. (2023, S. 5) und Kasner (2022, S. 5) berücksichtigt werden. Neben den Wirkungskategorien kann ebenfalls der Energiegehalt aller verschiedenen (erneuerbaren und nicht-erneuerbaren) Energiequellen, mit Hilfe der Cumulative Energy Demand (CED) Methode, quantifiziert werden (Frischknecht et al., 2015, S. 957). Diese Methode nutzt beispielsweise Kasner (2022, S. 5) in seiner Arbeit und berücksichtigt dabei die fünf Energiekategorien nicht-erneuerbar (fossil), nicht-erneuerbar (nuklear), erneuerbar (Biomasse), erneuerbar (Wind, Sonne und Erdwärme) und erneuerbar (Wasser), ausgedrückt in Megajoule (MJ).

Die Arbeiten von Cinar (2021) und Rentizelas et al. (2021) beschäftigen sich mit einem Reverse Logistic Network Design Problem beziehungsweise einer Reverse Supply

Network Design Optimierung, welche beide mit Hilfe eines Mixed-Integer-Linear-Program (MILP) entwickelt werden. In Bezug auf die ökologischen Umweltauswirkungen der Modelle und jeweiligen Szenarien betrachten beide die Schadstoffemissionen der einzelnen Prozessschritte. So betrachtet beispielsweise Rentizelas et al. (2021, S. 1808 & 1813) die Schadstoffemissionen von Ausgangstransport (Diesel), Eingangstransport (Diesel), Zerkleinerung (Diesel und Strom) und Vorzerkleinerung (Diesel) in tCO₂/Jahr.

Es ist zu erkennen, dass alle als relevant erachteten Literaturen in einer gewissen Art und Weise eine Quantifizierung der ökologischen Umweltauswirkungen vornehmen. Jedoch bringt keine der als relevant erachteten Literaturquellen die ökologischen Umweltauswirkungen in Bezug auf WKA in einen monetären Kontext.

Um einen Einblick zum Stand der Forschung in Bezug auf mögliche Bepreisungsmethoden von ökologischen Umweltauswirkungen, unabhängig einer WKA, zu erlangen, wurden die zusätzlichen Recherchen (SC3, SD3, SC4 und SD4) durchgeführt. Um weitere relevante Literatur zu erfassen, wurde die BaF Methode angewendet.

Die aus den zusätzlichen Recherchen als relevant erachteten Literaturquellen nutzen ebenfalls die oben beschriebene Methode des LCA. Es zeigt sich, dass das LCA eine oft genutzte und etablierte Methode zur Identifizierung der ökologischen Umweltauswirkungen eines Produktsystems ist. So nutzt beispielsweise Greenfeld et al. (2021, S. 4) Daten des jeweiligen Produkthanbieters und Gulotta et al. (2023, S. 3) führt Interviews mit Projektpartnern der Design- und Fertigungsabteilung des Herstellers durch, um spezifische Daten des LCI zu ermitteln. In Bezug auf die Methode des LCIA nutzen Gulotta et al. (2023) und Landgraf et al. (2022) die CML-IA Methode. Garcia-Velasquez und van der Meer (2023) und Kabakian und McManus (2023) nutzen hingegen die ReCiPe Methode, welche als ein Rezept (engl. recipe) zur Berechnung der Indikatoren der Wirkungskategorien angesehen wird und die Anfangsbuchstaben der Institute, die den Hauptbeitrag zu diesem Projekt geleistet haben, enthält (PRé Sustainability B.V., 2024). Greenfeld et al. (2021) verwendet die TRACI Methode. Zusätzlich zu den bereits gebrauchten Methoden, nutzen Gulotta et al. (2023) und Kabakian und McManus (2023) ebenfalls die CED Methode.

Wirkungskategorien wie beispielweise Climate Change in kgCO₂eq, Ozone Layer Depletion kgCFC-11eq oder Human Toxicity in kg1,4-DBeq werden unter anderem von Greenfeld et al. (2021, S. 5) und Gulotta et al. (2023, S. 6) berücksichtigt. Es ist anzumerken, dass die Anzahl der berücksichtigten Wirkungskategorien der verschiedenen Literaturquellen starke Unterschiede aufweist. Mit einer Anzahl von 4 berücksichtigt Ai et al. (2023) die wenigsten Wirkungskategorien, wohingegen Greenfeld et al. (2021) mit einer Anzahl von 28 die meisten Wirkungskategorien berücksichtigt. Die Anzahl und Auswahl der betrachteten Wirkungskategorien steht

somit in engem Bezug mit dem Detailgrad der in der jeweiligen Arbeit betrachteten ökologischen Umweltauswirkungen.

Um die quantifizierten ökologischen Umweltauswirkungen zu monetarisieren, nutzen die betrachteten Literaturquellen monetäre Gewichtungsfaktoren für die jeweiligen ökologischen Umweltauswirkungen, sogenannte Umweltpreise. Die bereits quantifizierten ökologischen Umweltauswirkungen der jeweiligen Wirkungskategorien werden mit den dazugehörigen Umweltpreisen multipliziert, wodurch die Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen erfolgt. Umweltpreise sind nach dem ‚*Environmental Prices Handbook*‘ von De Bruyn et al. (2018b, S. 4) konstruierte Preise für die sozialen Kosten der Verschmutzung, ausgedrückt in Euro pro Kilogramm Schadstoff. Sie geben den Verlust an wirtschaftlichem Wohlstand an, der entsteht, wenn ein zusätzliches Kilogramm des Schadstoffs in die Umwelt gelangt (Gulotta et al., 2023, S. 5; Landgraf et al., 2022, S. 6). Um die Ermittlung der Umweltpreise besser zu verstehen, wird der verwendete Ansatz von De Bruyn et al. (2018b) im Folgenden beschrieben.

„Eine bestimmte Tätigkeit führt zu einem bestimmten Eingriff in die Umwelt. Dieser Eingriff beziehungsweise diese politische Maßnahme führt zu einer Veränderung der Emissionen, der Belästigung oder der Ressourcenentnahme. Im Falle von Emissionen werden diese über die Luft, den Boden oder das Wasser in andere Gebiete transportiert, wo sie zu den bestehenden Emissionskonzentrationen hinzukommen. Diese Konzentration führt dann zu Veränderungen der für das menschliche Wohlbefinden relevanten Endpunkte. Diese Veränderungen können monetär bewertet werden, indem die Höhe der an den Endpunkten verursachten Schäden quantifiziert wird“ (De Bruyn et al., 2018b, S. 24).

In den berücksichtigten Literaturen werden über 12 unterschiedliche Bepreisungsmethoden verwendet, welche die jeweiligen Umweltpreise auf unterschiedliche Arten und Weisen ermitteln. Die Methoden Ecotax, Ecovalue, Environmental Prices (EP), Environmental Priorities Strategies in Product Design (EPS), Ecocosts / Value Ratio (EVR), Life-Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modelling (LIME), Milieugerelateerde Materiaalprestatie Gebouwelementen (MMG) und Stepwise werden dabei jeweils von mindestens 2 unterschiedlichen Literaturen verwendet. Die Methoden EP (6 Mal), Ecotax und Stepwise (5 Mal) und Ecovalue, EPS und LIME (4 Mal) werden hierbei am Häufigsten berücksichtigt.

Die Art der berücksichtigten Literaturen kann in 2 Kategorien aufgeteilt werden. Die erste Kategorie wendet ein oder mehrere Bepreisungsmethoden an einem spezifischen Use Case an. Die zweite Kategorie vergleicht mehrere Bepreisungsmethoden miteinander.

Greenfeld et al. (2021, S. 3) aus der ersten Kategorie verwendet beispielsweise das ‚*Environmental Prices Handbook*‘ von De Bruyn et al. (2018b) und ‚*Green Book: Estimating and Measuring External Costs of Air Pollution and Greenhouse Gas Emissions*‘ von Israelisches Ministerium für Umweltschutz (2020) als Datenquelle für die Umweltpreise am Use Case von Aquaponik-Systemen. Gulotta et al. (2023, S. 5) hingegen nutzt nur das ‚*Environmental Prices Handbook*‘ von De Bruyn et al. (2018b) am Use Case eines einheitlichen regenerativen Brennstoffzellenstapels. In der Arbeit von Landgraf et al. (2022, S. 7) wird der Mittelwert des Umweltpreises einer jeden Wirkungskategorie am Use Case von Weichen aus 16, beziehungsweise 11 Datenquellen ermittelt. Die Daten stammen beispielsweise aus Stepwise2006 aus ‚*Using the budget constraint to monetarise impact assessment results*‘ von Weidema (2009), Ecotax 2002 aus ‚*Weighting in LCA based on Ecotaxes*‘ von Finnveden et al. (2006) und ECOVALUE 2012 aus ‚*A new set of valuation factors for LCA and LCC based on damage costs - ECOVALUE 2012*‘ von Finnveden et al. (2013) (Landgraf et al., 2022, Appendix A). Um ein spezifisches Beispiel zu nennen, liegt der aus 16 Datenquellen gemittelte Umweltpreis der Wirkungskategorie Climate Change von Landgraf et al. (2022, S. 7), ausgedrückt durch den Indikator Global Warming Potential (GWP), bei 0.14822 €/kgCO₂eq. Neben den eben genannten Use Cases betrachten weitere Literaturen Produkte wie gesinterte Ziegel mit Kohleflugasche, biobasierte Chemikalien aus Zuckerrübenschnitzel, kommunale Feststoffabfälle, Heißmischasphalt oder Zement. Es ist zu erkennen, dass keine betrachtete Literatur, welche eine Bepreisungsmethode berücksichtigt oder anwendet, einen Bezug zu einer WKA als Produktsystem oder dessen Bauteile besitzt. Diese identifizierte wissenschaftliche Lücke unterstreicht die Wichtigkeit der in dieser Arbeit gestellten Hauptforschungsfrage und den hier durchgeführten Forschungsaufwand.

Nguyen et al. (2016) aus der zweiten Kategorie vergleicht beispielsweise die Methoden Ecotax, EPS2000 und Stepwise2006 und kommt zu dem Schluss, dass es viele Faktoren gibt, die das Gewicht der verschiedenen Umweltinterventionen bestimmen. Dazu gehören der Anwendungsbereich der Methode, die berücksichtigten Wirkungskategorien und vor allem die Art und Weise, wie monetäre Gewichtungsfaktoren abgeleitet werden (Nguyen et al., 2016, S. 22). Arendt et al. (2020) vergleicht die Bepreisungsmethoden Ecovalue12, Stepwise2006, LIME3, Ecotax, EVR, EPS, EP, Trucost und MMG. In Bezug auf die absoluten Werte der monetären Gewichtungsfaktoren der Wirkungskategorien erstellt Arendt et al. (2020) eine Rangfolge. Ecovalue12 weist die höchsten Werte, gefolgt von Ecotax, EVR, MMG und schließlich Trucost, EPS, Stepwise2006 und LIME3 auf. Das bedeutet, dass Ecovalue im Durchschnitt über alle Wirkungskategorien hinweg die höchsten und LIME3 die niedrigsten Werte aufweist (Arendt et al., 2020, S. 14).

Die Wahl der Kriterien aus Tabelle 5, zur Gegenüberstellung der relevanten Literatur der zusätzlichen Recherchen wurde wie folgt getroffen. Die Art der Literatur wurde

berücksichtigt, da sich ein Teil der Literatur mit der Anwendung von Bepreisungsmethoden und der andere Teil mit dem Vergleich von Bepreisungsmethoden befasst. Unterschiede der Zielstellung und des Aufbaus sind dabei zu erkennen. Das Kriterium, ob die Methode des LCA in der jeweiligen Literatur berücksichtigt wird, wurde genutzt, um die Popularität dieser Methode zur Bestimmung von ökologischen Umweltauswirkungen weiter zu untersuchen. Die Anzahl der berücksichtigten Wirkungskategorien steht in engem Bezug mit dem Detailgrad der betrachteten ökologischen Umweltauswirkungen der jeweiligen Literatur, weswegen dieses Kriterium für die Gegenüberstellung genutzt wurde. Die berücksichtigten Bepreisungsmethoden, sowie der in der jeweiligen Literatur verwendete Use Case, dienen der direkten Beantwortung der FF2, weswegen diese Kriterien verwendet wurden. In Tabelle 5 wird die Gegenüberstellung der relevanten Literaturquellen der zusätzlichen Recherchen anhand der Kategorien Art der Literatur, LCA in Literatur verwendet, Anzahl der verwendeten Wirkungskategorien, berücksichtigte Bepreisungsmethoden und verwendeter Use Case dargestellt.

Literatur	Art ^{a)}		LCA	WK ^{b)}	Bepreisungsmethoden ^{c)}												Use Case		
	AW	VG			ECC	ECT	ECV	EP	EPS	EVR	EXE	LIME	MMG	STW	TRU	WtP		Weitere	
Yi et al. (2011)	X		X	13								X						Kommunale Feststoffabfälle	
Nguyen et al. (2016)		X	X	10-15		X			X		X	X		X				Elektrizität	
Guo et al. (2019)	X		X	12												X		Gesinterte Ziegel mit Kohleflugasche	
Arendt et al. (2020)		X	X	18		X	X	X	X	X		X	X	X	X			-	
Amadei et al. (2021)		X	X	16		X	X	X	X					X				-	
Greenfeld et al. (2021)	X		X	28				X									1	Aquaponik-Systeme	
Landgraf et al. (2022)	X		X	5	X	X	X	X	X	X		X	X	X				1	Weichen
Al et al. (2023)	X		X	4														1	Heißmischasphalt
Garcia-Velasquez und van der Meer (2023)	X		X	7		X	X	X											Biobasierter Chemikalien aus Zuckerrübenschnitzel
Gulotta et al. (2023)	X		X	11				X											Einheitlicher regenerativer Brennstoffzellenstapel
Kabakian und McManus (2023)	X		X	14										X					Zement (Portlandzement Typ I)
Share in %	73	27	100		9	45	36	55	36	18	9	36	18	45	9	9			

^{a)} AW = Anwendung von Bepreisungsmethoden; VG = Vergleich von Bepreisungsmethoden

^{b)} WK = Anzahl der verwendeten Wirkungskategorien

^{c)} ECC = Ecocost; ECT = Ecotax; ECV = Ecovalue12; EP = Environmental Prices; EPS = Environmental Priorities Strategies in Product Design; EVR = Ecocosts / Value Ratio; EXE = ExternE; LIME = Life-Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modelling 3; STW = Stepwise2006; TRU = Trucost; WtP = Willingness to Pay

Tabelle 5: Gegenüberstellung der relevanten Literaturquellen und derer Bepreisungsmethoden (ohne WKA Bezug)

3.2.3 Beantwortung der Subforschungsfrage FF3

In diesem Unterkapitel wird die FF3 - „**Welche Eigenschaften besitzen die in FF2 identifizierten Bepreisungsmethoden und wie umfänglich sind diese?**“ - anhand der Ergebnisse der SLR und der BaF Methode beantwortet.

Bevor die einzelnen Bepreisungsmethoden aus Tabelle 5 erläutert werden, wird eine Limitation in Bezug auf die zu erläuternden Bepreisungsmethoden durchgeführt. Die

Bepreisungsmethoden der Kategorie ‚Weitere‘ sowie ‚Willingness to Pay‘ (WtP) der Tabelle 5 werden nicht erläutert und berücksichtigt. Die Kategorie ‚Weitere‘ enthält die Bepreisungsmethoden ‚*Green Book: Estimating and Measuring External Costs of Air Pollution and Greenhouse Gas Emissions*‘ von Israelisches Ministerium für Umweltschutz (2020) aus Greenfeld et al. (2021), eine eigens erstellte von Ai et al. (2023), sowie ‚*Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten*‘ von Bünger und Matthey (2018) aus Landgraf et al. (2022). Diese werden nicht berücksichtigt, da die Sprache der veröffentlichten Literaturquelle nicht in deutsch oder englisch verfügbar ist, die Grundlage der Bepreisungsmethode nicht ausreichend nachvollziehbar ist, oder eine zu geringe Anzahl an monetären Gewichtungsfaktoren zur Verfügung stehen. WtP wird im Folgenden als Ansatz zur Ermittlung der monetären Gewichtungsfaktoren angesehen und nicht als eine eigenständige Bepreisungsmethode. Ebenfalls wird die Bepreisungsmethode Environmental Priority Strategies in product design (EPS) nachfolgend nicht berücksichtigt. Diese Bepreisungsmethode wurde entwickelt, um Designer und Produktentwickler bei der Bewertung der Umweltverträglichkeit von Designoptionen zu unterstützen (Steen, 2015, S. 1). Da der Betrachtungsrahmen dieser Arbeit auf WKA liegt, welche bereits montiert wurden und am Ende ihres Produktlebenszyklus stehen, ist diese Bepreisungsmethode bereits von Grund auf unpassend. Neben den eben genannten Methoden wird auch die Bepreisungsmethode Milieugerelateerde Materialprestatie Gebouwelementen (MMG), zu deutsch ökologische Materialleistung von Bauelementen, nachfolgend nicht berücksichtigt. Grund dafür ist die Betrachtung von Baumaterialien oder Baulinien und deren ökologischen Umweltauswirkungen, was ebenfalls nicht auf den Betrachtungsrahmen dieser Arbeit und WKA zutrifft (De Nocker & Debacker, 2018). In Bezug auf die beiden Bepreisungsmethoden Ecocosts / Value Ratio (EVR) und Ecocost wird nur die Methode EVR berücksichtigt, da die Ecocost Methode ein Bestandteil der EVR Methode ist (Vogtländer & Mestre, 2009, S. 1).

Nachfolgend werden die Grundlagen und Eigenschaften der Bepreisungsmethoden Ecotax, Ecovalue, EP, ExternE, EVR, LIME, Stepwise und Trucost im Detail erläutert. Es wird sich hauptsächlich auf das Grundprinzip und die Berechnungsgrundlage, sowie auf den Entwickler, die Veröffentlichung und den Anwendungsbereich bezogen. Spezifische Wirkungskategorien und monetäre Gewichtungsfaktoren werden im nachfolgenden Kapitel 4 ‚Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen‘ genauer betrachtet und analysiert.

3.2.3.1 Ecotax

Die Bepreisungsmethode Ecotax wurde 1998 von Johansson (1999) unter dem Namen Ecotax98 entwickelt und 2002 von Eldh (2003) unter dem Namen Ecotax02 weiterentwickelt (Finnveden et al., 2006, S. 83; Nguyen et al., 2016, S. 15). Ecotax02 wurde bisher nicht überarbeitet und ist somit die aktuelle Version dieser

Bepreisungsmethode. Die Entwicklung von Ecotax02 basiert auf den drei aufeinanderfolgenden Schritten ‚Wahl der Wirkungskategorien‘, ‚Identifizierung geeigneter Steuern und Gebühren‘ und ‚Verknüpfung von Steuern und Wirkungskategorien‘ (Finnveden et al., 2006, S. 83). Im ersten Schritt werden die zu berücksichtigenden Wirkungskategorien ausgewählt. Hierfür werden die Wirkungskategorien der Gruppe A (Baseline Impact Categories; auch CML-IA; auch CML-Baseline) des Kapitels 4.3.2 ‚*Selection of impact categories*‘ aus ‚*Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards*‘ von Guinée (2002) gewählt. Im zweiten Schritt werden Umweltsteuern und Gebühren identifiziert, welche auf den spezifischen Fall geeignet sind. Diese werden als Ausdruck des Wertes angesehen, den die Gesellschaft den Umweltauswirkungen der Emissionen oder der Ressourcennutzung beimisst. Umweltsteuern, welche beispielsweise von Eurostat und Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) entwickelt und von Mitgliedstaaten akzeptiert wurden, ermöglichen vergleichende Studien zwischen verschiedenen Ländern in Bezug auf die Steuerstruktur, Bemessungsgrundlage oder Einnahmen. In manchen Fällen gibt es Steuerbefreiungen oder Subventionen für unterschiedliche Akteure oder Erzeugungsarten. In diesen Fällen wird jedoch immer das höhere Steuerniveau verwendet und als relevant angesehen. Im dritten Schritt werden die Wirkungskategorien mit den Steuern verknüpft, was bei einem direkten Zusammenhang der beiden Elemente keiner Nachberechnung bedarf. Eine CO₂-Steuer kann beispielsweise direkt mit der Wirkungskategorie Climate Change verknüpft werden, da diese die Einheit kgCO₂eq verwendet. Besteht ein indirekter Zusammenhang zwischen den beiden Elementen, muss eine Nachberechnung durchgeführt werden. Da es in manchen Fällen möglich ist, die Gewichtungsfaktoren einer selben Wirkungskategorie durch unterschiedliche Interventionen beziehungsweise durch unterschiedliches Eingreifen zu berechnen, wird die Spanne zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert berücksichtigt. Folglich wird für diese Wirkungskategorien ein Satz von zwei Gewichtungsfaktoren (Minimal- und Maximalwert) ermittelt. Die Ecotax Methode basiert konsequent auf Steuern und Gebühren auf Emissionen und Ressourcenverbrauch in Schweden (Finnveden, 2006, S.83). In Bezug auf die Verfügbarkeit der monetären Gewichtungsfaktoren ist nur eine geringe Anzahl an Daten aus Finnveden et al. (2006, S. 84) verfügbar, welche ursprünglich aus Eldh (2003) stammen.

3.2.3.2 Ecovalue

Die Bepreisungsmethode Ecovalue08 wurde von Ahlroth und Finnveden (2011) veröffentlicht und von Finnveden et al. (2013) überarbeitet. Die überarbeitete Methode wird Ecovalue12 genannt und konzentriert sich auf schwedische Verhältnisse, wobei die Werte des Gewichtungssatzes auf der Grundlage neuerer Studien überdacht, Standardwerte zur Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit hinzugefügt, die Werte an den Geldwert des Jahres 2010 angepasst und zwei weitere Wirkungskategorien

hinzugefügt wurden (Finnveden et al., 2013, S. 1-2). Die Charakterisierungsmethode CML-Baseline, wie auch in der Bepreisungsmethode Ecotax genutzt, wird für den Großteil der Wirkungskategorien verwendet. Lokale Allokationsfaktoren sowie eine thermodynamische Methode, welche auf dem Exergiegehalt basiert, werden für die restlichen Wirkungskategorien verwendet (Ahlroth & Finnveden, 2011, S. 1997). Ecovalue bildet einen Gewichtungssatz, um eine einheitliche Gewichtung der Umweltauswirkungen beziehungsweise der Schäden durch verschiedene Schadstoffe zu erhalten. Die Schadenswerte oder monetären Gewichtungsfaktoren beruhen auf Schätzungen der Zahlungsbereitschaft (WtP) für die Umweltqualität, basierend auf Studien zur kontingenten Bewertung (engl. contingent valuation (CV)), und auf Marktwerten für die Ressourcenerschöpfung beziehungsweise Marktpreisen (Ahlroth & Finnveden, 2011, S. 1994 & 1995 & 2001). Die zur Bewertung der Schäden verwendeten Methoden werden in Bezug zu den jeweiligen ausgewählten Wirkungskategorien in der nachfolgenden Tabelle 6 dargestellt.

Wirkungskategorie	Bewertungsmethode
Acidification	Kontingente Bewertung
Depletion of Abiotic Resources	Marktpreise (Knappheitsrente)
Eutrophication	Kontingente Bewertung
Forming of Tropospheric Ozone	Kontingente Bewertung & Marktpreise
Global Warming	Marktpreise
Human Health	Kontingente Bewertung

Tabelle 6: Bewertungsmethode der Schäden - Ecovalue08 (angelehnt an Ahlroth und Finnveden (2011, S. 1995))

Die expliziten Werte der Wirkungskategorien werden aus zuvor publizierten Literaturquellen und Studien verwendet. Für die Wirkungskategorie Ecotoxicity werden jedoch keine Schätzungen der Schadenswerte ermittelt, wodurch diese Wirkungskategorie nicht berücksichtigt wird (Ahlroth & Finnveden, 2011, S. 1996; Finnveden et al., 2013, S. 2 & 3). In Bezug auf die Verfügbarkeit der aktuellsten monetären Gewichtungsfaktoren und Wirkungskategorien stehen Daten aus Finnveden et al. (2013, S. 3), ausgedrückt in schwedischen Kronen (SEK) pro Schadenseinheit, zur Verfügung.

3.2.3.3 Environmental Prices

Die Bepreisungsmethode Environmental Prices (EP) wurde 2018 vom unabhängigen Forschungs- und Beratungsunternehmen CE Delft (De Bruyn et al., 2018a, 2018b) veröffentlicht. Der zugrunde gelegte Gesamtrahmen ist in Abbildung 12, angelehnt an De Bruyn et al. (2018b, S. 23), schematisch dargestellt.

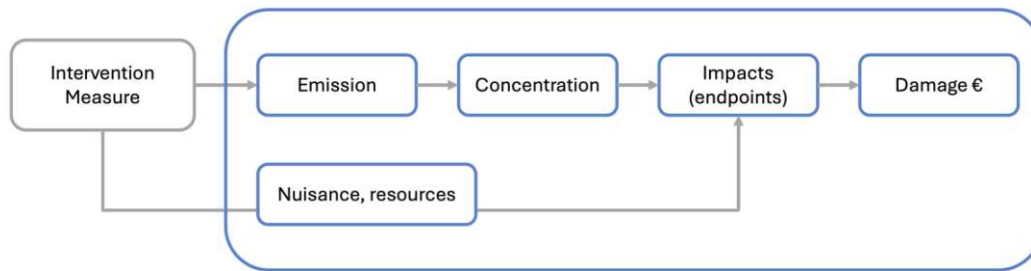


Abbildung 12: Gesamtrahmen, schematisch - Environmental Prices (angelehnt an De Bruyn et al. (2018b, S. 23))

Die Methode gibt Umweltpreise heraus, welche konstruierte Preise für die sozialen Kosten der Umweltverschmutzung, ausgedrückt in Euro pro Kilogramm Schadstoff, sind. Umweltpreise geben somit den Verlust an wirtschaftlichem Wohlstand an, der entsteht, wenn ein zusätzliches Kilogramm des Schadstoffs in die Umwelt gelangt. In ‚*Environmental Prices Handbook - EU28 version*‘ von De Bruyn et al. (2018b) stellen die Umweltpreise Durchschnittswerte für die EU28 dar, für Emissionen aus einer durchschnittlichen Emissionsquelle an einem durchschnittlichen Emissionsstandort im Jahr 2015. Diese Preise werden auf den drei Ebenen Schadstoff, midpoint und endpoint dargestellt. Die Preise auf Schadstoffebene geben Aufschluss über die Kosten der Umweltverschmutzung. Für über 2.500 Schadstoffe liefert De Bruyn et al. (2018b) solche Umweltpreise. Die Preise auf midpoint Ebene beziehen sich auf die bekannten Umweltthemen wie Climate Change und Acidification und können als Gewichtungsfaktor im LCA oder zur Berechnung der externen Kosten bestimmter Materialien oder Produkte verwendet werden. Die Preise auf endpoint Ebene werden für die endpoints Human Health, Ecosystem Services, Damage to Buildings and Materials, Resource Availability und Nuisance angegeben und bilden ein zentrales Element, da sie zur Ableitung der midpoint Werte verwendet werden (De Bruyn et al., 2018b, S. 4-6). Um einen Überblick über die behandelten Beziehungen der Schadstoff, midpoint und endpoint Ebenen zu liefern, wird Abbildung 13, angelehnt an De Bruyn et al. (2018b, S. 4), verwendet. Jeder Pfeil stellt eine Beziehung dar, die im Handbuch erfasst wurde. Gestrichelte Linien stellen Beziehungen dar, die untersucht und (teilweise) quantifiziert wurden.

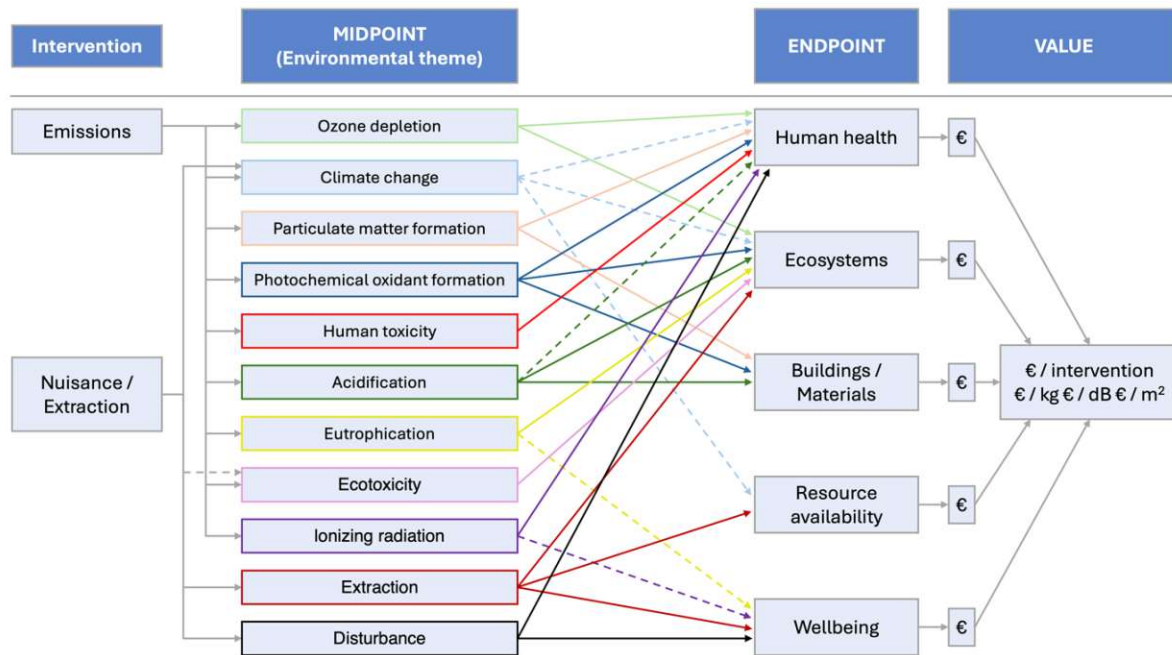


Abbildung 13: Beziehungen Schadstoff, midpoint & endpoint Ebene - Environmental Prices (angelehnt an De Bruyn et al. (2018b, S. 4))

Explizite Werte der monetären Gewichtungsfaktoren stehen in den bereits angeführten Literaturquellen ausführlich zur Verfügung. Die aktuellste Veröffentlichung von CE Delft zu diesem Themengebiet stammt aus dem Jahr 2023 von De Bruyn et al. (2023), ist jedoch nur in niederländischer Sprache verfügbar.

3.2.3.4 ExternE

Die Bepreisungsmethode ExternE wurde 1995 von einer Kollaboration aus europäischen Mitgliedsstaaten und dem US Department of Energy veröffentlicht. 1998 und 2005 wurde die Methode überarbeitet (Bickel & Friedrich, 2005, S. 7; Preiss & Klotz, 2008, S. 5). ExternE bietet einen Rahmen für die Umwandlung von Auswirkungen in eine gemeinsame Einheit, zwar einem Geldwert, und umfasst 5 Hauptstufen. In der ersten Stufe wird die zu bewertende Tätigkeit und das Hintergrundzenario, in das die Tätigkeit eingebettet ist, sowie die wichtigen Wirkungskategorien und externen Effekte definiert. In der zweiten Stufe werden die Auswirkungen oder Effekte der Tätigkeit, in physikalischen Einheiten, geschätzt. In der dritten Stufe werden die Auswirkungen monetarisiert, was zu externen Kosten führt. In der vierten Stufe werden Unsicherheiten bewertet. In der fünften Stufe werden die Ergebnisse analysiert und Schlussfolgerungen gezogen (Bickel & Friedrich, 2005, S. 1). Die in dieser Bepreisungsmethode betrachteten Umweltauswirkungen oder Auswirkungen, die durch die Freisetzung von Stoffen oder Energie in die Umweltmedien Luft, Boden und Wasser verursacht werden, werden mit Hilfe des Impact Pathway Approach (IPA) quantifiziert. Mit dem IPA kann der Weg eines Schadstoffs vom Ort seiner Emission bis zu den betroffenen Rezeptoren (Bevölkerung, Pflanzen, Wälder, Gebäude usw.) verfolgt werden, wodurch die Schadenskosten

(damage costs) berechnet werden können. Im ersten Schritt Emission des IPA werden relevante Technologien und Schadstoffe angegeben. Im zweiten Schritt Dispersion werden die erhöhten Schadstoffkonzentrationen in allen betroffenen Regionen berechnet. Im dritten Schritt Impact wird die Berechnung der kumulierten Exposition durch die erhöhte Konzentration, gefolgt von der Berechnung der Auswirkungen aufgrund dieser Exposition unter Verwendung einer Expositions-Wirkungs-Funktion durchgeführt. Im vierten und letzten Schritt Cost werden diese Auswirkungen in Geldwerten bewertet. Dabei werden die Methode WtP sowie aktuelle Marktpreise verwendet (Bickel & Friedrich, 2005, S. 2&4&35). Abbildung 14 stellt den IPA, angelehnt an Bickel und Friedrich (2005, S. 2), schematisch dar.

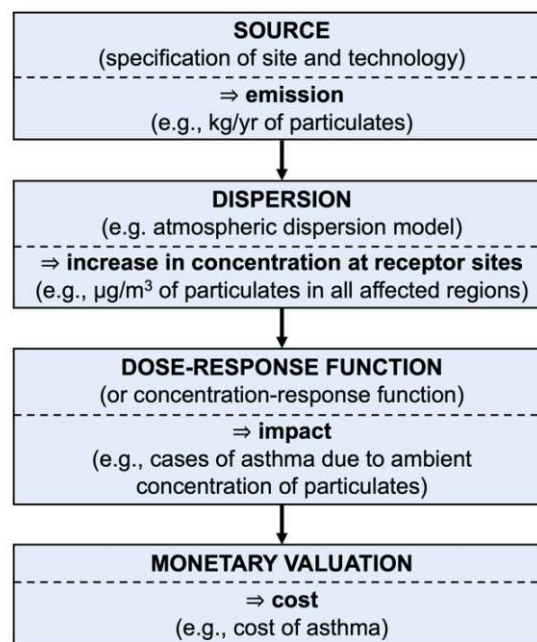


Abbildung 14: Impact Pathway Approach (IPA) - schematischer Ablauf (angelehnt an Bickel und Friedrich (2005, S. 2))

In Bezug auf die Verfügbarkeit der expliziten monetären Gewichtungsfaktoren, welche für die praktische Anwendung an Wirkungskategorien genutzt werden können, ist nur eine sehr geringe Anzahl zu ermitteln.

3.2.3.5 EVR

Die Bepreisungsmethode Ecocost / Value Ratio (EVR) wurde von der gemeinnützige Stiftung Stichting Sustainable Impact Metrics (SSIM), welche aus einer Partnerschaft zwischen dem privaten Unternehmen Aiming Better von Joost Vogtländer und der Technischen Universität Delft seit 1998 besteht, herausgegeben. Die ursprüngliche Berechnungsgrundlage der Methode aus 1999 wurde bereits in den Jahren 2007, 2012, 2017 und 2022 überarbeitet (Stichting Sustainability Impact Metrics, 2024b). Die EVR Methode setzt die ökologische Produktkette, welche durch die Ecocosts beschrieben werden, mit der Wertschöpfungskette, welche durch den Value

beschrieben wird, in Verbindung. Der für diese Arbeit relevante Teil der EVR Methode bezieht sich auf die Ecocosts, weswegen der Value nachfolgend unberücksichtigt gelassen wird. EVR wird im LCIA verwendet, um die Höhe der Umweltbelastung auf der Grundlage der Vermeidung dieser Belastung auszudrücken. Das Modell basiert auf der Summe der Grenzvermeidungskosten während des Lebenszyklus eines Produkts für Schadstoffemissionen, Materialabbau, Energieverbrauch und Landumwandlung. Es handelt sich um die Kosten, die anfallen, um die Umweltverschmutzung und den Materialverbrauch in der Wirtschaft auf ein Niveau zu reduzieren, das mit der Tragfähigkeit der Erde in Einklang steht (Vogtländer & Mestre, 2009, S. 1&3). Um einen Überblick über das Ecocost Modell der EVR Methode zu geben, wird Abbildung 15, angelehnt an Stichting Sustainability Impact Metrics (2024a), verwendet.

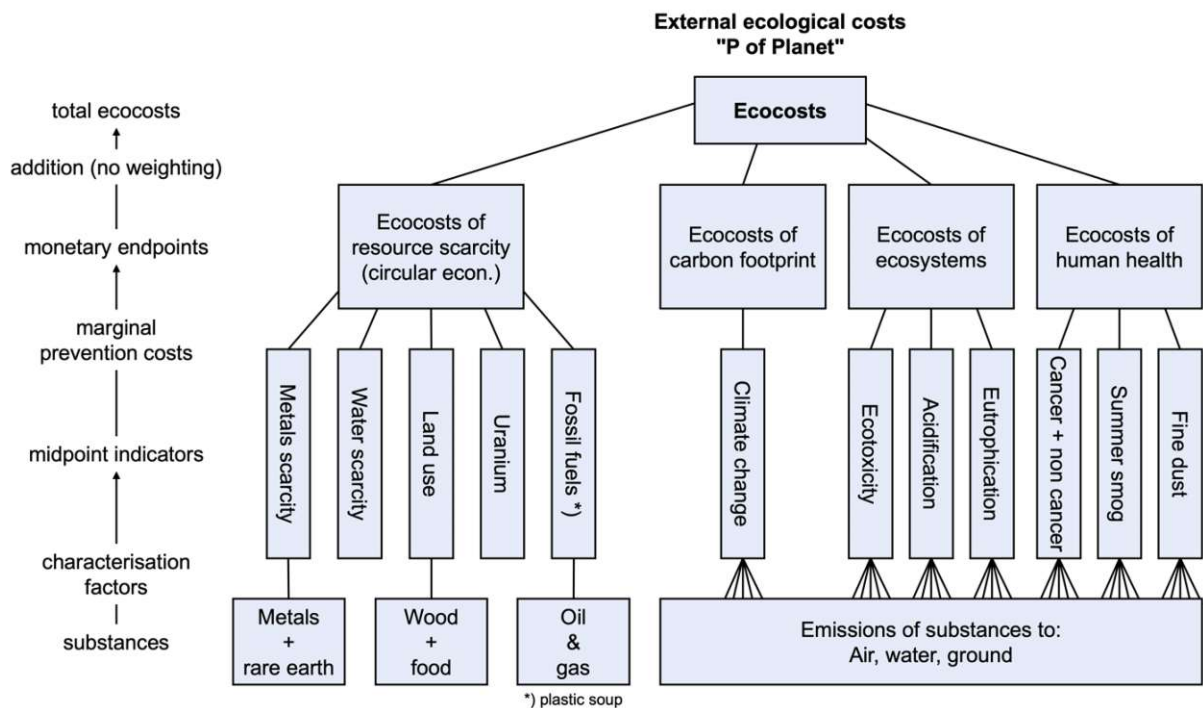


Abbildung 15: Modellaufbau - Ecocost aus EVR Methode (angelehnt an Stichting Sustainability Impact Metrics (2024a))

Die Grenzvermeidungskosten ergeben sich aus der so genannten Vermeidungskurve, welche den Vermeidungsgrad, in Abhängigkeit der Vermeidungsmaßnahmen und der Vermeidungskosten, abbildet. Für jede Emissionsart werden die Kosten und die Auswirkungen für mehrere zu ergreifende Vermeidungsmaßnahmen kumuliert, eine sogenannte Was-wäre-wenn-Rechnung. An einem bestimmten Punkt der Kurve a wird die Norm für Nachhaltigkeit erreicht, welches den NOAEL-Wert (No Observed Adverse Effect Level) darstellt, ab welchem die Schadstoffkonzentration unter dem so genannte vernachlässigbaren Risiko liegt. Die Grenzvermeidungskosten werden durch die Kosten pro Reduktionseinheit (beispielsweise kgCO₂eq. für Climate Change) der letzten Maßnahme definiert, die als Linie b dargestellt sind (Stichting Sustainability

Impact Metrics, 2024b; Vogtländer et al., 2001, S. 355). Der Vorteil einer solchen Berechnung besteht darin, dass die Grenzvermeidungskosten mit den Kosten der teuersten besten verfügbaren Technologie, die zur Erreichung des Ziels erforderlich ist, in Beziehung stehen. Um beispielsweise die CO₂-Emissionen auf ein nachhaltiges Niveau zu senken, sind die Grenzvermeidungskosten die Kosten, welche für den Ersatz von Kohlekraftwerken durch Off-Shore-Windkraftanlagen entstehen (Stichting Sustainability Impact Metrics, 2024b). Abbildung 16, angelehnt an Vogtländer et al. (2001, S. 355), stellt eine Vermeidungskurve schematisch dar.

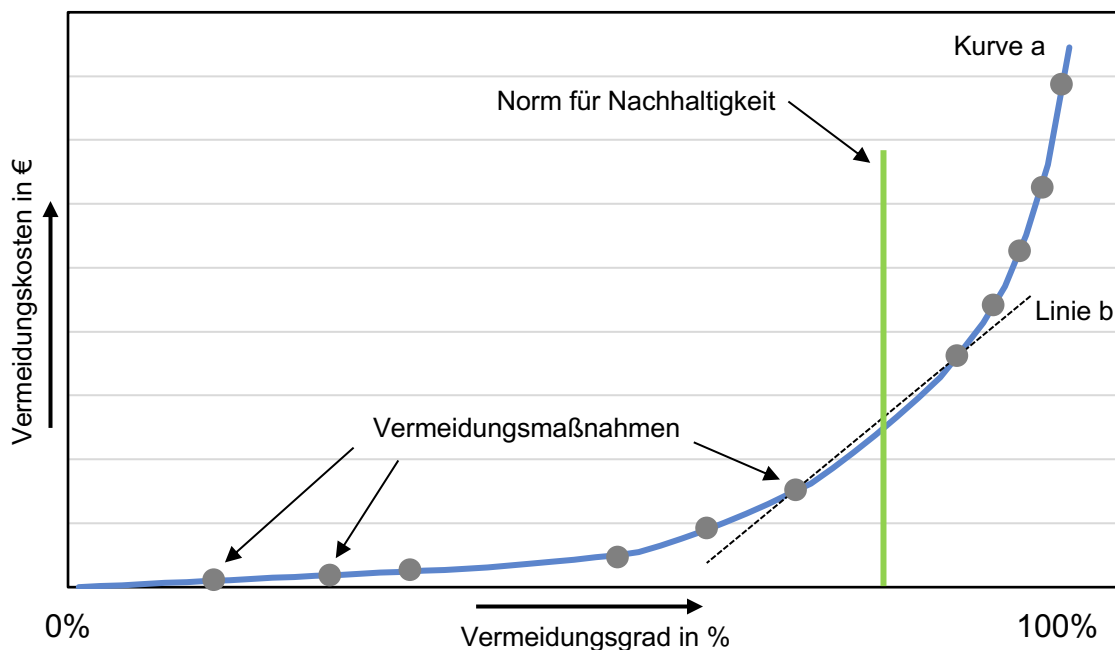


Abbildung 16: Vermeidungskurve (schematisch, angelehnt an Vogtländer et al. (2001, S. 355))

Die Bepreisungsmethode EVR bezieht sich auf den geografischen Gültigkeitsbereich Europa, wobei die Berechnung der monetären Gewichtungsfaktoren zusätzlich auf die Situation der europäischen Union ausgelegt ist (Stichting Sustainability Impact Metrics, 2024a). In Bezug auf die Verfügbarkeit der monetären Gewichtungsfaktoren sind die expliziten und aktuellen Werte für diese Bepreisungsmethode auf der Website des Herausgebers SSIM umfangreich verfügbar.

3.2.3.6 LIME

Die Bepreisungsmethode Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modelling (LIME) wurde 2000 (LIME1) vom Japanese national project of LCA veröffentlicht und 2006 (LIME2) und 2016 (LIME3) weiterentwickelt. LIME3 bezieht sich auf eine globale Betrachtung der Umwelt, während sich LIME1 und LIME2 auf Umweltbedingungen in Japan beschränken. LIME besteht aus den drei grundsätzlichen Schritten Charakterisierung, Schadensbewertung und Gewichtung, wobei das Ziel der Methode auf der Zusammenfassung der Schäden an den endpoints in einer Währung liegt (Inaba & Itsubo, 2018, S. 2271&2272). Abbildung 17 zeigt die

grundlegende Struktur von LIME3, angelehnt an Inaba und Itsubo (2018, S. 2273). Beim Schritt der Charakterisierung werden die Faktoren der Kategorie Inventory identifiziert, wodurch eine Bestandsaufnahme durchgeführt wird. Der Schritt Schadensbewertung berücksichtigt 8 Schadensfaktoren (Damage factors), welche nach unterschiedlichen Modellen bewertet werden. So wird beispielsweise für die Schadensbewertung der Faktoren Air Pollution und Photochemical Oxidant Substances ein globales chemisches Transportmodell von Tang et al. (2015a, 2015b) verwendet, welches grenzüberschreitende Effekte berücksichtigt. LIME3 betrachtet neben 9 midpoint auch 4 endpoint Wirkungskategorien. Die midpoint Wirkungskategorien überdecken sich mit den 8 Schadensfaktoren (Damage factors), werden jedoch durch die Kategorie Solid Waste erweitert. Die Schadensbewertung bezieht sich auf die 4 endpoints Human Health (in Disability Adjusted Life Year (DALY)), Social Assets (in US\$), Biodiversity (in Expected Increase in Number of Extinction Species (EINES)) und Primary Production (in Net Primary Production (NPP)) (Nguyen et al., 2016, S. 16). Im letzten Schritt Gewichtung werden die endpoints mit Hilfe von 2 Gewichtungsfaktoren gewichtet. Der erste Gewichtungsfaktor gewichtet die 4 endpoints dimensionslos (in Summe 1,0 beziehungsweise 100%), in Abhängigkeit des betrachteten Landes. Faktoren für die G20 Länder, G8 Industrieländer und Schwellenländer (G20 ohne G8), sowie die einzelnen G20 Länder, wurden anhand einer Fragebogenerhebung mit 6.400 Antworten ermittelt. Der zweite Gewichtungsfaktor gewichtet die endpoints ökonomisch für jedes Land, in dem die Zahlungsbereitschaft (WtP) berücksichtigt wird. Die Einheit dieses Gewichtungsfaktors des endpoints Human Health ist beispielsweise US\$/1-year DALY. Schlussendlich werden die Schäden zusammengefasst in einem einzelnen Indikator in US\$ ausgegeben (Inaba & Itsubo, 2018, S. 2271-2274).

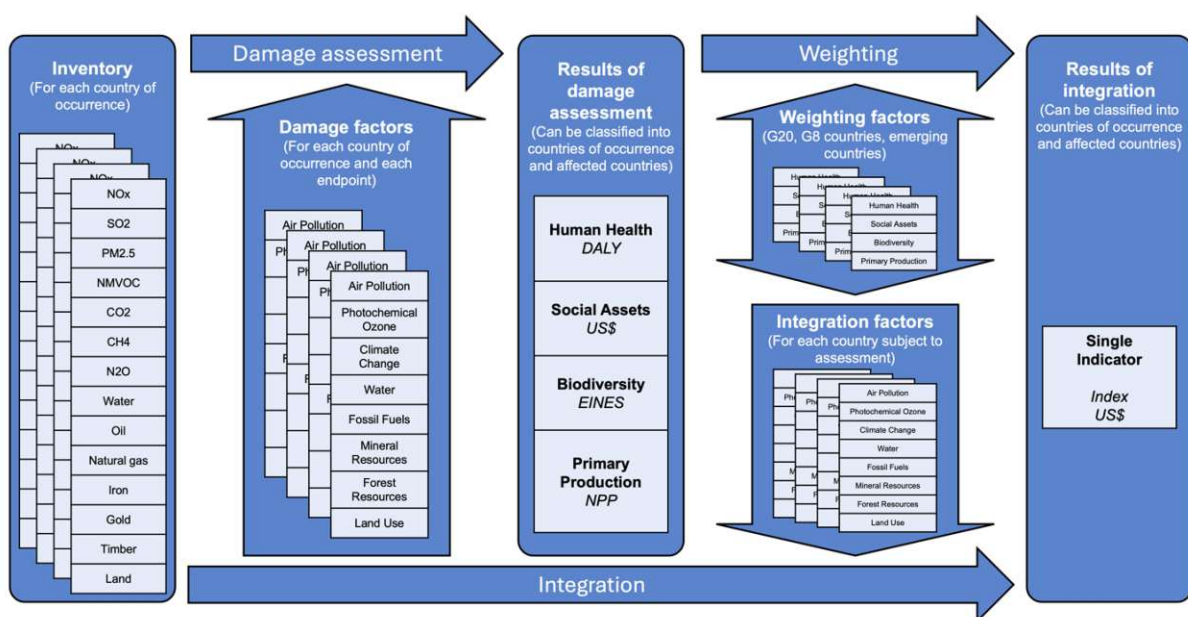


Abbildung 17: Grundlegende Struktur - LIME3 (angelehnt an Inaba und Itsubo (2018, S. 2273))

In Bezug auf die Verfügbarkeit der expliziten monetären Gewichtungsfaktoren steht über die Homepage der Life Cycle Assessment Society of Japan (2024) die aktuelle Koeffizientenliste von 2018 detailliert zur Verfügung.

3.2.3.7 Stepwise

Die Bepreisungsmethode Stepwise wurde 2008 von Weidema (2009) unter dem Namen Stepwise2006 entwickelt und veröffentlicht, jedoch seit dem nicht weiterentwickelt. Als Basis, der für diese Methode verwendeten endpoint beziehungsweise Schadenskategorien, wird die LCIA Methode Ecoindicator99 verwendet, welche für die drei Schutzgüter Humans, Ecosystems und Resources physikalische Werte liefert. Aus diesen drei Schutzgütern ergeben sich die drei endpoint Kategorien Human Well-Being, Biodiversity und Resource Productivity für Stepwise. Human Well-Being wird in der Einheit Quality Adjusted Life Year (QALY) ausgedrückt, welches ein Lebensjahr bei vollem Wohlbefinden angibt. Der monetäre Wert eines QALY ergibt sich aus der Budgetbeschränkung, welches das durchschnittliche Jahreseinkommen als Maximum ansieht, das eine durchschnittliche Person für ein zusätzliches Lebensjahr bezahlen kann. Der Wert für ein QALY liegt bei 74.000 EUR. Biodiversity wird in der Einheit Biodiversity Adjusted Hectare Year (BAHY) ausgedrückt, welche den potentiellen Anteil an bestehenden Arten ausdrückt und den Schaden im Verhältnis zur Anzahl der unter natürlichen Bedingungen endemischen Arten angibt. Der monetäre Wert ist als ein Teil unseres Wohlstands definiert, den wir bereit sind, für den Schutz der Ökosysteme zu opfern. Das Verhältnis zwischen QALY und BAHY ergibt sich zu 21 BAHY/QALY. Resource Productivity wird in einer monetären Einheit ausgedrückt. In der Arbeit von Weidema (2009) in EUR₂₀₀₃. Der Schaden wird als Verlust an künftiger Wirtschaftsleistung gemessen, der durch den aktuellen Schaden an der Ressource verursacht wird. Als Basis für die midpoint Wirkungskategorien von Stepwise2006 werden die midpoint Wirkungskategorien der beiden LCIA Methoden EDIP2003 und IMPACT2002+ verwendet und auf die Schadenskategorien von Ecoindicator99 erweitert (Nguyen et al., 2016, S. 15&16; Weidema, 2009, S. 1592-1596). Abbildung 18 stellt die Verbindungen der einzelnen midpoints zu den drei endpoints aus Weidema et al. (2018, S. 159-164) dar.

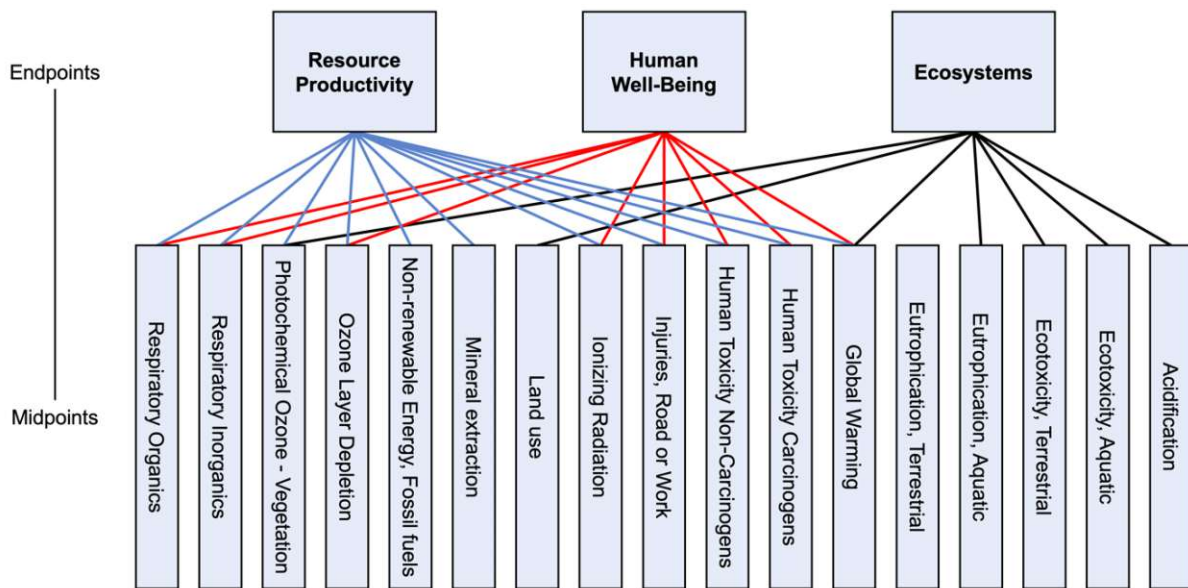


Abbildung 18: Verbindungen von Midpoints zu Endpoints - Stepwise2006 (zusammengetragen aus Weidema et al. (2018, S. 159-164))

Ziel der Stepwise Methode ist es, die zum Zeitpunkt der Entwicklung aufgetretenen Unsicherheiten und Unvollständigkeiten bei der Monetarisierung eines breiten Spektrums von Umweltauswirkungen zu verringern und damit die Anwendbarkeit und Praktikabilität von Kosten-Nutzen-Analysen zu verbessern (Nguyen et al., 2016, S. 15-16). Stepwise ermöglicht es zusätzlich, die Ergebnisse in einer optionalen Wahl der Endpoints in QALY oder Geldeinheit auszudrücken. Der geografische Gültigkeitsbereich liegt bei dieser Methode auf einer globalen Betrachtung (Weidema, 2009, S. 1594&1596). Explizite Werte der monetären Gewichtungsfaktoren stehen in den bereits angeführten Literaturquellen ausführlich zur Verfügung.

3.2.3.8 Trucost

Die Bepreisungsmethode Trucost wird seit dem Jahr 2000 vom gleichnamigen Unternehmen entwickelt und verwendet. Trucost recherchiert, standardisiert und validiert Umweltdaten von über 14.000 der weltweit größten börsennotierten Aktiengesellschaften, die etwa 99 % der globalen Marktkapitalisierung repräsentieren. Die Daten stammen aus öffentlichen Quellen wie Nachhaltigkeits- oder Umweltberichten der Unternehmen. Aus diesen Daten werden die durch die unternehmerischen Tätigkeiten erzeugten Umweltauswirkungen, wie beispielsweise der CO₂-Ausstoß oder der Wasserverbrauch, ermittelt (S&P Trucost Limited, 2019, S. 3-5&12). Die mit der Nutzung einer Ressource oder der Emission eines Schadstoffs verbundenen negativen externen Effekte sind die Schadenskosten, welche die Umweltauswirkungen einer Unternehmenstätigkeit in Geldwerten widerspiegelt. Trucost unterscheidet zwischen direkten, indirekten und Gesamtschadenskosten. Direkte Schadenskosten sind die Kosten, die mit den direkten Tätigkeiten eines Unternehmens verbunden sind, während indirekte Schadenskosten diejenigen sind, die in der Lieferkette des Unternehmens anfallen. Die Gesamtschadenskosten sind die

Summe dieser beiden Kosten. Durch Multiplikation der Unternehmensdaten über die Menge der verbrauchten Ressourcen oder der emittierten Schadstoffe (beispielsweise m³ Wasserverbrauch oder kg erzeugter Abfall) mit den monetären Gewichtungsfaktoren, werden diese Schadenskosten berechnet. Die monetären Gewichtungsfaktoren von Trucost sind Faktoren, die den durchschnittlichen Schadenswert darstellen, der die externen Kosten von Schäden am menschlichen, natürlichen und gebauten Kapital repräsentiert. Alle verwendeten Werte sind sekundär und eine Synthese aus vorhandener veröffentlichter und unveröffentlichter Literatur (S&P Trucost Limited, 2019, S. 11&12). In Bezug auf die Verfügbarkeit der expliziten monetären Gewichtungsfaktoren ist nur eine sehr geringe Anzahl aus sekundärer Literatur zu ermitteln. Arendt et al. (2020, S. 16) merkt bereits in ihrer Arbeit an, dass die expliziten Werte von Trucost nicht veröffentlicht werden. In Bezug auf die Aktualität der Methode ist zu erwarten, dass diese auf Grund der hohen Aktualität der verwendeten Unternehmensdaten ebenfalls hoch ist.

4 Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen

Zu Beginn dieses Kapitels werden die identifizierten Bepreisungsmethoden der Literaturquellen der SLR sowie die Wirkungskategorien der Literaturquellen mit WKA Bezug untersucht und miteinander verglichen. Anschließend werden die Vor- und Nachteile der verglichenen Bepreisungsmethoden hervorgehoben. Anhand der identifizierten Vor- und Nachteile wird abschließend eine kritische Auswahl einer Bepreisungsmethode getroffen, welche für den in dieser Arbeit definierten Use Case WKA am besten geeignet ist.

4.1 Vergleich der Bepreisungsmethoden und Wirkungskategorien der SLR

In diesem Unterkapitel werden die identifizierten Bepreisungsmethoden anhand verschiedener Kriterien, sowie die berücksichtigten Wirkungskategorien der Literaturquellen mit WKA Bezug der SLR, untersucht und miteinander verglichen.

Die in Kapitel 3.2.3 ‚Beantwortung der Subforschungsfrage FF3‘ berücksichtigten Bepreisungsmethoden werden nun anhand verschiedener Kategorien gegenübergestellt, welche vom Autor dieser Arbeit selbst entwickelt werden und sich aus den Daten und Ergebnissen der untersuchten Literaturquellen der SLR ergeben.

Die Kategorie geografischer Gültigkeitsbereich gibt die geografische Lage an, auf welche sich die entwickelte Bepreisungsmethode ausrichtet. Diese Kategorie wird berücksichtigt, da der geografische Gültigkeitsbereich nach Amadei et al. (2021, S. 9) und Arendt et al. (2020, S. 33) eines des stärksten Einflusskriteriums in Bezug auf die monetären Gewichtungsfaktoren ist. Die monetäre Bewertung von Umweltauswirkungen ist häufig wohlstandsabhängig und somit stark vom geografischen Gültigkeitsbereich abhängig (Arendt et al., 2020, S. 5). Die Ergebnisse dieser Kategorie werden in Tabelle 7 dargestellt.

Des weiteren wird die Kategorie Wirkungskategorien betrachtet, welche die berücksichtigten Wirkungskategorien einer jeden Methode beinhaltet. Mit Hilfe der identifizierten Wirkungskategorien der Bepreisungsmethoden lässt sich im späteren Verlauf dieser Arbeit ein Vergleich mit den berücksichtigten Wirkungskategorien der Literaturquellen mit WKA Bezug durchführen, wodurch ein Bezug zwischen den bereits existierenden Bepreisungsmethoden und dem Use Case einer WKA abgeleitet werden kann. In den betrachteten Bepreisungsmethoden werden zwischen zwei Arten von Wirkungskategorien unterschieden. Zum einen midpoint Wirkungskategorien, welche

Indikatoren für den Vergleich von Umweltmaßnahmen auf einer Ebene der Ursache-Wirkungs-Kette zwischen Emissionen und Endpunkt liefern, und zum anderen endpoint Wirkungskategorien, auch Schadenskategorien genannt, welche Indikatoren für den Vergleich von Umweltmaßnahmen auf einer Ebene der Ursache-Wirkungs-Kette am Endpunkt liefern (Amadei et al., 2021, S. 2; Landgraf et al., 2022, S. 5; Nagle et al., 2020, S. 6). In Bezug auf die Unsicherheit und Akzeptanz von midpoint und endpoint Wirkungskategorien ist die Unsicherheit bei endpoint Wirkungskategorien im Vergleich zu midpoint Wirkungskategorien höher, sowie die Akzeptanz geringer. Grund dafür ist die Ermittlung der endpoint Wirkungskategorien, da diese oftmals mit Hilfe von selbst erstellten Modellen von midpoint Wirkungskategorien abgeleitet werden (Landgraf et al., 2022, S. 5-6). Um die Unsicherheit der Ergebnisse dieser Arbeit zu verringern, wird sich ausschließlich auf die Betrachtung von midpoint Wirkungskategorien beschränkt. Auf Grund dieser Beschränkung wird die Bepreisungsmethode ExternE, welche sich auf die Schadenskosten beziehungsweise endpoint Wirkungskategorien bezieht, nachfolgend nicht mehr berücksichtigt (Bickel & Friedrich, 2005; Preiss & Klotz, 2008). Da identische Wirkungskategorien in verschiedenen Bepreisungsmethoden teils unterschiedlich genannt werden, wie beispielsweise Ozone Depletion in Environmental Prices (De Bruyn et al., 2018b, S. 86) und Ozone Layer Depletion in Stepwise2006 (Nguyen et al., 2016, S. 16), werden diese in dieser Arbeit vereinheitlicht, um die Daten besser vergleichen zu können. Ebenfalls werden die in dieser Arbeit betrachteten Wirkungskategorien in englischer Sprache dargestellt, womit eine hochwertigere und schnellere Vergleichbarkeit der Daten und Ergebnisse mit internationaler Literatur ermöglicht wird. Zusätzlich wird die Fehleranfälligkeit durch die Übersetzung der Wirkungskategorien eliminiert. Die Ergebnisse dieser Kategorie werden in Tabelle 8 dargestellt.

Ebenfalls wird die Kategorie Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren betrachtet, welche das Vorgehen zur Ermittlung der jeweiligen monetären Gewichtungsfaktoren beschreibt. Das Vorgehen hat nach Nguyen et al. (2016, S. 22) einen starken Einfluss auf die monetären Gewichtungsfaktoren. Die Ergebnisse dieser Kategorie werden in Tabelle 9 dargestellt.

Abschließend werden die Literaturquellen zur Ermittlung der Daten der einzelnen Bepreisungsmethoden in Tabelle 10 dargestellt.

Bepreisungsmethode		Ecotax	Ecovalue	Environmental Prices	EVR	LIME	Stepwise	Trucost
Global						X	X	X
Europa				X	X			
Länderspezifisch	Schweden	X	X					

Tabelle 7: Vergleich Bepreisungsmethoden – Kategorie Geografischer Gültigkeitsbereich

Aus Tabelle 7 ist zu erkennen, dass sich der Großteil der betrachteten Bepreisungsmethoden auf eine globale Betrachtung ausrichtet. Vereinzelt länderspezifische Bepreisungsmethoden, wie die beiden Methoden Ecotax und Ecovalue für Schweden, und die beiden Methoden EVR und EP im europäischen Gültigkeitsbereich sind am zweithäufigsten vorhanden.

Bepreisungsmethode	Ecotax	Ecovalue	Environmental Prices	EVR	LIME	Stepwise	Trucost	Anteil in %
Midpoint Wirkungskategorie								
Acidification	X	X	X	X		X	X	86%
Climate Change	X	X	X	X	X	X	X	100%
Depletion (Abiotic Resources)	X	X						29%
Depletion (Fossil Fuels)				X	X			29%
Depletion (Minerals)				X	X	X		43%
Depletion (Forest)					X			14%
Depletion (Water)				X	X		X	43%
Ecotoxicity				X				14%
Ecotoxicity (Aquatic)						X		14%
Ecotoxicity (Freshwater)	X		X					29%
Ecotoxicity (Marine)	X	X	X					43%
Ecotoxicity (Terrestrial)	X		X			X		43%
Energy (Non-Renewable)						X		14%
Eutrophication	X			X			X	43%
Eutrophication (Aquatic)						X		14%
Eutrophication (Freshwater)		X	X					29%
Eutrophication (Marine)		X	X				X	43%
Eutrophication (Terrestrial)						X		14%
Human Toxicity	X	X	X	X		X		71%
Injuries (Road / Work)						X		14%
Ionizing Radiation			X			X		29%
Land Use	X		X	X	X	X		71%
Nuisance			X					14%
Ozone Layer Depletion	X		X			X		43%
Particulate Matter		X	X	X			X	57%
Photochemical Oxidation	X	X	X	X	X	X	X	100%
Pollution (Air)					X			14%
Respiratory (Inorganics)						X		14%
Respiratory (Organics)						X		14%
Uranium				X				14%
Waste					X			14%
Anzahl Wirkungskategorien	11	9	14	12	9	16	7	-

Tabelle 8: Vergleich Bepreisungsmethoden – Kategorie Wirkungskategorien

Die Anzahl aller midpoint Wirkungskategorien der 7 untersuchten Bepreisungsmethoden aus Tabelle 8 beläuft sich auf 31 unterschiedliche Stück. Es ist jedoch zu erkennen, dass gewisse Wirkungskategorien eine spezifische Unterteilung besitzen, wie beispielsweise Depletion (Abiotic Resources, Fossil Fuels, Minerals,

Forest, Water). Die Anzahl der allgemeinen Wirkungskategorien ist somit geringer. Bei der Betrachtung der Anzahl der berücksichtigten Wirkungskategorien der einzelnen Bepreisungsmethoden ist zu erkennen, dass die Methoden Stepwise (16 Stück) und Environmental Prices (14 Stück) die höchsten Werte aufweisen. Trucost (7 Stück), Ecovalue (9 Stück) und LIME (9 Stück) hingegen die geringsten Werte. Die von den Bepreisungsmethoden am häufigsten verwendeten Wirkungskategorien sind Climate Change (7x), Photochemical Oxidation (7x), Acidification (6x), Human Toxicity (5x), Land Use (5x) und Particulate Matter (4x).

Bepreisungsmethode	Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren
Ecotax	Umweltsteuern und -gebühren auf Emissionen und Ressourcenverbrauch in Schweden (WtA)
Ecovalue	Schätzungen der Zahlungsbereitschaft für die Umweltqualität, basierend auf Studien zur kontingenten Bewertung (CV), und auf Marktwerten für die Ressourcenerschöpfung (WtP)
Environmental Prices	Durchschnittswerte für die sozialen Kosten der Umweltverschmutzung für die EU28, für Emissionen aus einer durchschnittlichen Emissionsquelle an einem durchschnittlichen Emissionsstandort im Jahr 2015 (WtA)
EVR	Grenzvermeidungskosten während des Lebenszyklus eines Produkts (WtP)
LIME	Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung einer Schadenseinheit (WtP)
Stepwise	Durchschnittliches Jahreseinkommen als Maximum der Budgetbeschränkung, Zahlungsbereitschaft für Schutz der Ökosysteme und Verlust an künftiger Wirtschaftsleistung durch Schaden (WtP & WtA)
Trucost	Synthese aus vorhandener veröffentlichter und unveröffentlichter Literatur

Tabelle 9: Vergleich Bepreisungsmethoden – Kategorie Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren

Für die Ermittlung der monetären Gewichtungsfaktoren in Tabelle 9 werden unterschiedliche Ansätze verwendet. So bezieht sich die Basis der Bepreisungsmethoden Ecovalue, EVR und LIME auf die Kosten für die Vermeidung des Schadens (engl. Willingness to Pay (WtP)). Die Basis der Bepreisungsmethoden Ecotax und EP bezieht sich hingegen auf die entstandenen Kosten durch den bereits erfolgten Schaden (engl. Willingness to Accept (WtA)). Stepwise bezieht sich für die Ermittlung der monetären Gewichtungsfaktoren auf die Kosten für die Vermeidung des Schadens und auf die Kosten durch den bereits erfolgten Schaden (WtP & WtA). Die Trucost Methode dagegen nutzt monetäre Gewichtungsfaktoren aus bereits veröffentlichter und unveröffentlichter Literatur.

In Tabelle 10 sind die Literaturquellen angegeben, aus welchen die Daten der einzelnen Bepreisungsmethoden bezogen wurden.

Bepreisungsmethode	Literaturquellen
Ecotax	Finnveden et al. (2006)
	Guinée (2002)
	Nguyen et al. (2016)
Ecovalue	Ahlroth und Finnveden (2011)
	Finnveden et al. (2013)
Environmental Prices	De Bruyn et al. (2018a)
	De Bruyn et al. (2018b)
	Gulotta et al. (2023)
EVR	Stichting Sustainability Impact Metrics (2024a)
	Stichting Sustainability Impact Metrics (2024b)
	Vogtländer und Mestre (2009)
	Vogtländer et al. (2001)
LIME	Inaba und Itsubo (2018)
	Life Cycle Assessment Society of Japan (2024)
	Nguyen et al. (2016)
Stepwise	Nguyen et al. (2016)
	Weidema et al. (2018)
	Weidema (2009)
Trucost	Arendt et al. (2020)
	S&P Trucost Limited (2019)

Tabelle 10: Vergleich Bepreisungsmethoden - Literaturquellen

4.2 Vergleich der Wirkungskategorien der Literaturquellen mit Windkraftanlagen Bezug

In diesem Unterkapitel werden zunächst die Wirkungskategorien der Literaturquellen der SLR, welche einen WKA Bezug besitzen, untersucht. Wie bereits begründet, werden nur midpoint Wirkungskategorien betrachtet, da diese eine geringere Unsicherheit und höhere Akzeptanz gegenüber den endpoint Wirkungskategorien besitzen. Auf Grund der Beschränkung auf midpoint Wirkungskategorien wird die Literaturquelle Nagle et al. (2020), welche ausschließlich endpoint Wirkungskategorien betrachtet, in diesem Unterkapitel nicht berücksichtigt. Ebenfalls werden die Namen der Wirkungskategorien wieder vereinheitlicht und in englischer Sprache dargestellt. Aus Tabelle 11 ist abzulesen, dass die Literaturquellen Kasner (2022) (6 Stück) und Gennitsaris et al. (2023) (3 Stück) die höchste Anzahl an berücksichtigten Wirkungskategorien besitzen. Die restlichen Literaturquellen berücksichtigen jeweils nur eine Wirkungskategorie. Die von den Literaturquellen am häufigsten berücksichtigten Wirkungskategorien sind Climate Change (6x), CED (2x) und Energy (Non-Renewable) (2x).

Literaturquelle	Cinar (2021)	Cong et al. (2023)	Gennitsaris et al. (2023)	Kasner (2022)	Liu (2017)	Rentizelas et al. (2021)	Sommer et al. (2022)	Anteil in %
Acidification				X				14%
Climate Change	X	X	X	X		X	X	86%
Cumulative Energy Demand				X	X			29%
Energy (Non-Renewable)			X	X				29%
Energy (Renewable)				X				14%
Eutrophication				X				14%
Land Use			X					14%
Anzahl Wirkungskategorien	1	1	3	6	1	1	1	-

Tabelle 11: Vergleich Wirkungskategorien (mit WKA Bezug)

In Tabelle 12 ist für die in diesem Unterkapitel betrachteten Literaturquellen eine Kurzbeschreibung enthalten, welche auf den WKA Bezug der Literaturquelle eingeht.

Literaturquelle	Kurzbeschreibung WKA Bezug
Cinar (2021)	Vorschlag eines mixed integer linear programming (MILP) Modells zur Ermittlung einer langfristigen Strategie für die EoL Phase, am Use Case des Windkraftsektors
Cong et al. (2023)	Durchführung eines LCA mit vier EoL Szenarien für das Rotorblattmodell LM 37.3 P2 zur Ermittlung der Kohlenstoffemissionsintensität in China
Gennitsaris et al. (2023)	Bewertung der Effizienz verschiedener EoL Optionen für die Stilllegung von Windkraftanlagen unter Berücksichtigung technologischer, wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte in einem Kreislaufwirtschaftskontext mittels LCA und Data Envelopment Analysis (DEA)
Kasner (2022)	Analyse der effizienten Nutzung von Materialien während des Lebenszyklus eines Windparks im Hinblick auf die drei EoL Szenarien Stilllegung, Lebensdauererweiterung und Erneuerung
Liu (2017)	Bewertung des Abfallintervalls der Rotorblätter, Berechnung der Umweltauswirkungen und Analyse der Unterschiede zwischen allen möglichen EoL Optionen in Bezug auf die Umwelt- und Finanzleistung
Rentizelas et al. (2021)	Untersuchung der Durchführbarkeit der EoL Option des mechanischen Recyclings zur Wiederverwendung von alten Rotorblättern bei der Herstellung von Verbundwerkstoffen sowie der Optimierung des dafür benötigten Reverse Supply Netzwerks in Europa
Sommer et al. (2022)	Quantifizierung der Umweltauswirkungen verschiedener EoL Optionen mittels LCA, sowie die Entwicklung eines Entscheidungshilfewerkzeugs für die Analyse der Auswirkungen von politischen Entscheidungen auf die Gestaltung der erforderlichen Behandlungsinfrastruktur am Use Case von alten CFK und GFK Abfällen von Rotorblättern

Tabelle 12: Vergleich Wirkungskategorien - Kurzbeschreibung WKA Bezug

Zusätzlich werden die erfassten midpoint Wirkungskategorien der Literaturen mit WKA Bezug mit den darin betrachteten EoL Optionen in Verbindung gesetzt. Die EoL

Optionen werden in zwei Kategorien aufgeteilt. Zum einen in EoL Optionen (Komponenten & Materialien), welche sich auf die Komponenten und Materialien einer WKA bezieht. Die EoL Optionen Deponierung, Recover, Recycling (mechanisch, thermisch, chemisch, keine Angaben des spezifischen Verfahrens), Repurpose und Remanufacture sind darin enthalten. Zum anderen in EoL Optionen (WKA System), welche sich auf die WKA als gesamtes System bezieht. Die EoL Optionen Stilllegung, Lebensdauererweiterung und Erneuerung sind darin enthalten. Diese Kategorie wird jedoch ausgegraut in Tabelle 13 dargestellt, da sich diese Arbeit nur mit WKA befasst, welche endgültig am Ende ihres Nutzungszyklus stehen und nicht mehr erneuert werden oder deren Lebensdauer nicht erweitert wird. Ebenfalls wird Stilllegung ausgegraut, da diese in der Arbeit von Gennitsaris et al. (2023) die EoL Optionen Deponierung, Recycling (Mechanisch, Pyrolyse, Mikrowellenpyrolyse) und Repurpose und nach Kasner (2022) die EoL Optionen Deponierung und Recycling (keine Angaben des spezifischen Verfahrens) beinhaltet, welche bereits in der Kategorie EoL Optionen (Komponenten & Materialien) erfasst werden. Die Kategorie EoL Optionen (WKA System) wird somit nur dargestellt, jedoch in der Berechnung dieser Tabelle und in der weiteren Arbeit nicht berücksichtigt.

In Tabelle 13 ist zu erkennen, dass die EoL Option Deponierung mit allen 7 identifizierten midpoint Wirkungskategorien der berücksichtigten Literaturen verbunden ist. Mit 6 identifizierten midpoint Wirkungskategorien ist die EoL Option Recycling verbunden. Die restlichen identifizierten EoL Optionen Repurpose, Recover und Remanufacture sind jeweils mit 3, 2 und 1 midpoint Wirkungskategorie(n) verbunden.

Bei der Betrachtung der Anzahl der verbundenen midpoint Wirkungskategorien mit der jeweiligen EoL Phase ist zu erkennen, dass die EoL Option Deponierung 11-mal mit midpoint Wirkungskategorien verbunden wird. Die midpoint Wirkungskategorien Climate Change, Energy (Non-Renewable), und CED werden von 3, 2 und 2 unterschiedlichen Literaturquellen mit der EoL Option Deponierung verbunden, wohingegen Energy (Renewable), Eutrophication, Land Use und Acidification jeweils nur von einer Literaturquelle mit der EoL Option Deponierung verbunden werden. Die unterkategorisierten Recyclingverfahren mechanisches Recycling und keine Angabe des spezifischen Verfahrens werden 7-mal mit midpoint Wirkungskategorien verbunden. Die restlichen EoL Optionen Recover, thermisches Recycling, chemisches Recycling, Repurpose und Remanufacture werden zwischen 5-mal und 1-mal mit midpoint Wirkungskategorien verbunden.

Betrachtet man die Anzahl der verbundenen EoL Optionen mit der jeweiligen midpoint Wirkungskategorie ist zu erkennen, dass die Wirkungskategorie Climate Change mit allen 5 EoL Optionen verbunden ist. Die Wirkungskategorien CED, Energy (Non-

Renewable) und Land Use sind mit jeweils 3 EoL Optionen verbunden. Acidification, Energy (Renewable) und Eutrophication sind jeweils mit 2 EoL Optionen verbunden.

Untersucht man die Verbindungen der einzelnen midpoint Wirkungskategorien mit den zusätzlich unterkategorisierten EoL Optionen (EoL Option Recycling wird in die einzelnen Verfahren aufgeteilt), in Bezug auf deren Vorkommen in den berücksichtigten Literaturen, ist zu erkennen, dass die midpoint Wirkungskategorie Climate Change mit der EoL Option Recycling (mechanisch) in 4 Literaturen und mit der EoL Option Deponierung in 3 Literaturen berücksichtigt wird.

Gesamtanzahl	Anzahl einzelner EoL Optionen*	Wirkungskategorien	EoL Optionen (WKA Komponenten & Materialien)										EoL Optionen** (WKA System)			
			Deponierung	Recover	Recycling							Repurpose	Remanufacture	Stilllegung	Lebensdauererweiterung	Erneuerung
					Mechanisch	Thermisch		Chemisch		keine Angabe des spez. Verfahrens						
				Schredder	Pyrolyse	Wirbelschichtpyrolyse	Mikrowellenpyrolyse	Solvolyse	HVF							
2	2	Acidification	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
10	3	Cumulative Energy Demand	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	2	1
7	3	Energy (Non-Renewable)	2	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
2	2	Energy (Renewable)	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
2	2	Eutrophication	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
19	5	Climate Change	3	2	4	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
5	3	Land Use	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
		Anzahl einzelner Wirkungskategorien	7	2	4	4	2	4	2	2	6	3	1	6	6	6
		Gesamtanzahl	11	3	7	5	2	4	2	2	7	3	1	6	7	6

*Für ‚Anzahl einzelner EoL Optionen‘ wird die EoL Option Recycling nicht unterkategorisiert betrachtet

**Kategorie wird zur besseren Übersicht dargestellt, jedoch nicht in Berechnung der Tabelle und weiteren Arbeit berücksichtigt

Tabelle 13: Bezug zwischen midpoint Wirkungskategorien und EoL Optionen verschiedener Literaturquellen (mit WKA Bezug)

4.3 Vor- und Nachteile der identifizierten Bepreisungsmethoden in Bezug auf den Use Case Windkraftanlage

Zu Beginn dieses Unterkapitels wird der Use Case WKA definiert und erläutert, um anschließend die Vor- und Nachteile der identifizierten Bepreisungsmethoden anhand des Use Case darzustellen.

Der Use Case Windkraftanlagen bezieht sich auf WKA, welche am Ende ihrer Nutzungsphase stehen und einer Stilllegung unterzogen werden, keiner Lebensdauererweiterung oder Erneuerung. Ebenfalls bezieht sich der Use Case auf die Komponenten und Materialien der WKA, nicht auf die WKA als System selbst. Alle technisch möglichen EoL Optionen, welche in dieser Arbeit identifiziert wurden, werden grundsätzlich berücksichtigt. Für das spätere Modell kann jedoch eine Einschränkung der berücksichtigten EoL Optionen erforderlich sein, um die Komplexität des Modells an den geforderten Umfang dieser Arbeit anzupassen. Des Weiteren werden nur WKA betrachtet, welche an Land installiert sind (On-Shore), jedoch nicht vor Küsten im Meer (Off-Shore). Zudem wird der Standort der installierten WKA auf das Land Österreich eingeschränkt. Der Use Case beschränkt sich nicht auf ein spezifisches WKA Modell eines Herstellers, wodurch die Generalisierbarkeit des späteren Modells erhöht wird.

Die Ausarbeitung der Vor- und Nachteile der Bepreisungsmethoden wird für die bereits in Kapitel 3.2.3 ‚Beantwortung der Subforschungsfrage FF3‘ identifizierten Bepreisungsmethoden Ecotax, Ecovalue, EP, EVR, LIME, Stepwise und Trucost durchgeführt. Mit Hilfe der Vor- und Nachteile lässt sich nachfolgend eine der für den Use Case der Windkraftanlagen geeignetste Bepreisungsmethode ermitteln. Um die Auswahl der geeignetsten Bepreisungsmethode zu erleichtern, benötigt es sinnvolle Kriterien, anhand derer die Bepreisungsmethoden miteinander verglichen werden können. Diese Vergleichskriterien werden vom Autor dieser Arbeit gewählt und stützen sich auf bereits ermittelte Daten und Informationen der gesichteten Literaturquellen. Vor- und Nachteile der Bepreisungsmethoden werden ebenfalls nach diesen Vergleichskriterien ermittelt. Die Verwendung von Vergleichskriterien ist an die Verwendung von Auswahl- und Beurteilungskriterien des vierten Kapitels ‚*Kriterien für die Verfahrensauswahl und den Verfahrensvergleich*‘ von Hartmann (2004) angelehnt.

Folgende Vergleichskriterien werden für die Ermittlung der Vor- und Nachteile der Bepreisungsmethoden verwendet: Geografischer Gültigkeitsbereich, Ermittlung monetäre Gewichtungsfaktoren, Datenverfügbarkeit, Qualität Wirkungskategorien, Aktualität und Herausgeber. Um die Vergleichbarkeit der Bepreisungsmethoden zueinander zu verbessern, wird ein Vergleichskriterium anhand vorab definierter Werte als Vor- oder Nachteil einer Bepreisungsmethode bestimmt. Diese Werte werden nachfolgend für die einzelnen Vergleichskriterien genannt und begründet.

Beim Vergleichskriterium **Geografischer Gültigkeitsbereich** wird Global und Länderspezifisch auf Grund des Use Case, welcher den Standort Österreich definiert, als Nachteil angesehen. Global berücksichtigt einen umfänglicheren Bereich als Europa und ist somit weniger zutreffend für den Use Case Österreich. Bei Länderspezifisch, ungleich Österreich, entspricht der Gültigkeitsbereich nicht dem des geforderten Use Case. Europa wird für dieses Vergleichskriterium als Vorteil

angesehen, da es den geringsten geografischen Gültigkeitsbereich einschließt, ohne den geforderten Bereich Österreich zu vernachlässigen.

Beim Vergleichskriterium **Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren** wird zwischen den Kosten für die Vermeidung des Schadens, oder auch der Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von Veränderungen gegenüber dem derzeitigen Zustand der Umwelt (engl. Willingness to Pay (WtP)), und den Kosten durch den bereits erfolgten Schaden, oder der Zahlungsbereitschaft für die Inkaufnahme von Umweltschäden (engl. Willingness to Accept (WtA)), unterschieden (De Bruyn et al., 2018b, S. 54; Nguyen et al., 2016, S. 15). Obwohl der Unterschied zwischen WtP und WtA intensiv untersucht wurde, gibt es in der Umweltökonomie eine starke Tendenz, WtP anstelle von WtA zu verwenden, vor allem weil WtA oft Proteststimmen und höhere Werte hervorbringt (Arendt et al., 2020, S. 5). Aus diesem Grund werden die Kosten für die Vermeidung des Schadens zur Ermittlung der monetären Gewichtungsfaktoren als Vorteil angesehen. Hingegen werden die Kosten durch den bereits erfolgten Schaden zur Ermittlung der monetären Gewichtungsfaktoren als Nachteil angesehen.

Beim Vergleichskriterium **Datenverfügbarkeit** wird zwischen primären und sekundären (Literatur-) Quellen, aus welchen die expliziten Werte der monetären Gewichtungsfaktoren entnommen werden, unterschieden. (Literatur-) Quellen, welche vom Herausgeber der Bepreisungsmethode veröffentlicht wurden, werden in diesem Fall als primäre (Literatur-) Quellen definiert und als Vorteil dieses Vergleichskriteriums angesehen. (Literatur-) Quellen, welche nicht vom Herausgeber der Bepreisungsmethode veröffentlicht wurden, werden in diesem Fall als sekundäre (Literatur-) Quellen definiert und als Nachteil dieses Vergleichskriteriums angesehen.

Beim Vergleichskriterium **Anwendbarkeit Wirkungskategorien - Use Case WKA** wird die Anwendbarkeit der verwendeten midpoint Wirkungskategorien der einzelnen Bepreisungsmethoden in Bezug auf den Use Case und der EoL Optionen von WKA betrachtet. Die Auswahl der midpoint Wirkungskategorien, welche für diesen Use Case eine hohe Anwendbarkeit darstellen, wird anhand der Auswahl der Wirkungskategorien der Lebenszyklusanalyse (engl. Life-Cycle-Assessment (LCA)) durchgeführt.

„Unter Berücksichtigung des Ziels und des Untersuchungsrahmens muss die Auswahl der Wirkungskategorien einen umfassenden Satz von mit dem zu untersuchenden Produktsystem verbundenen Umweltthemen widerspiegeln“ (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021b).

Der Untersuchungsrahmen für diesen Use Case beginnt ab dem Zeitpunkt der Demontage der WKA, beinhaltet unter anderem Transporte der Materialien und Komponenten und die Durchführung der jeweiligen EoL Optionen, und endet mit der

abschließenden Verarbeitung der Materialien und Komponenten der verwendeten EoL Optionen. Für die Auswahl der Wirkungskategorien, deren Anwendbarkeit am Use Case WKA für dieses Vergleichskriterium als hoch angesehen wird, wird die Methode CML als Basis verwendet, welche eine Reihe von midpoint Wirkungskategorien für die Folgenabschätzung des LCA vorschlägt. Auf diese Methode und die darin beschriebenen midpoint Wirkungskategorien der Gruppe A (CML-Baseline) wird sich für diesen Use Case WKA bezogen, da diese bereits häufig in LCA von WKA namhafter WKA-Hersteller verwendet wird und robuste Ergebnisse für die potenziellen midpoint Auswirkungen erzielt (Garrett & Rønde, 2011; Mali & Garrett, 2023). Ebenfalls bezieht sich die von der Universität Leiden entwickelte CML Methode auf den geografischen Gültigkeitsbereich Europa, was für den in dieser Arbeit betrachteten Use Case von ausreichender Genauigkeit ist (Guinée, 2002, S. 67&68; PRé Sustainability B.V., 2022, S. 8-11). In der CML-Baseline Methode sind die expliziten midpoint Wirkungskategorien Acidification, Climate Change, Depletion of Abiotic Resources, Ecotoxicity (Freshwater), Ecotoxicity (Marine), Ecotoxicity (Terrestrial), Eutrophication, Human Toxicity, Impacts of Land Use (Land Competition), Photo-oxidant Formation und Stratospheric Ozone Depletion enthalten (Guinée, 2002, S. 67&68). Bei der Auswahl der Wirkungskategorien der CML-Baseline Methode, deren Anwendbarkeit am Use Case WKA für dieses Vergleichskriterium als hoch angesehen wird, werden die im LCA einer WKA von Mali und Garrett (2023, S. 36) verwendeten Wirkungskategorien ausgewählt. Diese sind Acidification, Climate Change, Depletion of Abiotic Resources, Ecotoxicity (Freshwater), Ecotoxicity (Marine), Ecotoxicity (Terrestrial), Eutrophication, Human Toxicity und Photo-oxidant Formation. Die Wirkungskategorie Stratospheric Ozone Depletion wird nicht berücksichtigt, da es seit der Einführung des Montrealer Protokolls im Jahr 1987, das sowohl den Verbrauch als auch die Emission von ozonabbauenden Stoffen drastisch reduziert hat, nicht mehr als bedeutendes Problem angesehen wird (Mali & Garrett, 2023, S. 36). Hingegen wird die Anwendbarkeit der Wirkungskategorie Impacts of Land Use (Land Competition) zusätzlich als hoch angesehen, da diese stark von unterschiedlichen EoL Optionen abhängt, was Gennitsaris et al. (2023) in seiner Arbeit darstellt. Nachfolgend werden alle für dieses Vergleichskriterium ausgewählten midpoint Wirkungskategorien genannt und definiert. Wie bereits angemerkt können sich die Namen derselben Wirkungskategorien unterschiedlicher Literaturquellen voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund werden die Namen identischer Wirkungskategorien an die der bereits genannten Wirkungskategorien der vorherigen Kapitel angeglichen.

Acidification: Versauernde Schadstoffe haben eine Vielzahl von Auswirkungen auf Boden, Grundwasser, Oberflächengewässer, biologische Organismen, Ökosysteme und Materialien (Gebäude). Beispiele hierfür sind das Fischsterben in skandinavischen Seen, das Waldsterben und das Zerbröckeln von Baumaterialien (Guinée, 2002, S. 81).

Climate Change: Der Klimawandel wird als die Auswirkungen menschlicher Emissionen auf den Strahlungsantrieb (d. h. die Absorption von Wärmestrahlung) der Atmosphäre definiert. Die meisten dieser Emissionen verstärken den Strahlungsantrieb, wodurch die Temperatur an der Erdoberfläche ansteigt. Dies kann wiederum nachteilige Auswirkungen auf die Gesundheit der Ökosysteme, die menschliche Gesundheit und den materiellen Wohlstand haben. Dies wird im Volksmund als Treibhauseffekt bezeichnet (Guinée, 2002, S. 74&75).

Depletion of Abiotic Resources: Abiotische Ressourcen sind natürliche Ressourcen (einschließlich Energieressourcen) wie Eisenerz, Erdöl und Windenergie, die als nicht lebendig angesehen werden (Guinée, 2002, S. 71).

Ecotoxicity (Freshwater): Diese Wirkungskategorie umfasst die Auswirkungen toxischer Stoffe in Luft, Wasser und Boden auf Süßwasserökosysteme (Guinée, 2002, S. 77; PRé Sustainability B.V., 2022, S. 9).

Ecotoxicity (Marine): Diese Wirkungskategorie umfasst die Auswirkungen toxischer Stoffe in Luft, Wasser und Boden auf marine Ökosysteme (Guinée, 2002, S. 77; PRé Sustainability B.V., 2022, S. 10).

Ecotoxicity (Terrestrial): Diese Wirkungskategorie umfasst die Auswirkungen toxischer Stoffe in Luft, Wasser und Boden auf terrestrische Ökosysteme (Guinée, 2002, S. 78; PRé Sustainability B.V., 2022, S. 10).

Eutrophication: Eutrophierung (auch als Nährstoffanreicherung bekannt) umfasst alle potenziellen Auswirkungen, die auf einen übermäßigen Gehalt an Makronährstoffen in der Umwelt zurückzuführen sind, der durch Nährstoffemissionen in Luft, Wasser und Boden verursacht wird (Guinée, 2002, S. 82; PRé Sustainability B.V., 2022, S. 10).

Human Toxicity: Diese Wirkungskategorie umfasst die Auswirkungen von toxischen Stoffen in der Umwelt auf die menschliche Gesundheit. Die Auswirkungen der Exposition gegenüber toxischen Stoffen am Arbeitsplatz werden jedoch nicht berücksichtigt (Guinée, 2002, S. 76).

Land Use (zuvor Impacts of Land Use (Land Competition)): Diese Wirkungskategorie der Auswirkungen der Landnutzung befasst sich mit dem Verlust von Land als Ressource, im Sinne einer vorübergehenden Nichtverfügbarkeit (Guinée, 2002, S. 73).

Photochemical Oxidation (zuvor Photo-oxidant Formation): Photochemische Oxidation ist die Bildung reaktiver chemischer Verbindungen wie Ozon durch die Einwirkung von Sonnenlicht auf bestimmte primäre Luftschadstoffe. Diese reaktiven Verbindungen können für die menschliche Gesundheit und die Ökosysteme schädlich sein und auch Nutzpflanzen schädigen (Guinée, 2002, S. 80).

Betrachtet eine Bepreisungsmethode 8 oder mehr Wirkungskategorien, welche eine hohe Verwertbarkeit für den Use Case WKA aufweisen, wird dieses Vergleichskriterium für diese Methode als Vorteil angesehen. Werden weniger als 8 Wirkungskategorien betrachtet, welche eine hohe Verwertbarkeit für den Use Case WKA aufweisen, wird dieses Vergleichskriterium für diese Methode als Nachteil angesehen.

Beim Vergleichskriterium **Aktualität** wird die Häufigkeit der Überarbeitungen und Weiterentwicklungen der Bepreisungsmethoden, sowie der Zeitpunkt der Veröffentlichung betrachtet. Bepreisungsmethoden, welche mehrere Überarbeitungen oder Weiterentwicklungen erhalten haben, beziehungsweise innerhalb der letzten Jahre veröffentlicht wurden, werden für dieses Vergleichskriterium als Vorteil angesehen, da sie mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit aktuelle Daten und Erkenntnisse berücksichtigen. Bepreisungsmethoden, welche selten bis nie überarbeitet oder weiterentwickelt, beziehungsweise vor sehr langer Zeit veröffentlicht wurden, werden aufgrund veralteter Daten und Erkenntnisse für dieses Vergleichskriterium als Nachteil angesehen, da ihre Aktualität nicht mehr gewährleistet werden kann.

Beim Vergleichskriterium **Herausgeber** wird der Entwickler und Herausgeber der Bepreisungsmethode betrachtet. Bepreisungsmethoden, welche von einer Universität entwickelt und veröffentlicht wurden, werden für dieses Vergleichskriterium als Vorteil angesehen, da die wissenschaftliche Basis des Modells gegeben ist. Ebenfalls werden staatliche Entwickler und Herausgeber, beziehungsweise für politische Zwecke entwickelte Bepreisungsmethoden, für das Vergleichskriterium Herausgeber als Vorteil angesehen, da der Bezug zur praktischen und politischen Anwendung dieser Methoden sehr hoch ist. Unternehmen, welche eine Bepreisungsmethode entwickeln und veröffentlichen werden als Nachteil angesehen, da eine branchenspezifische Befangenheit sehr wahrscheinlich ist.

Die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Bepreisungsmethoden, in Bezug auf die Vergleichskriterien, werden nachfolgend in Tabelle 15 dargestellt. Ein ‚+‘, beziehungsweise ein grün hinterlegtes Feld stellt einen Vorteil des Vergleichskriteriums der Bepreisungsmethode dar. Ein ‚-‘, beziehungsweise ein rot hinterlegtes Feld stellt einen Nachteil des Vergleichskriteriums der Bepreisungsmethode dar. Um die Transparenz zu erhöhen, wird die Herkunft der verwendeten Daten der einzelnen Vergleichskriterien kurz genannt. Daten für den Geografischen Gültigkeitsbereich stammen aus Tabelle 7. Daten für die Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren stammt aus Tabelle 9. Daten der Datenverfügbarkeit, Aktualität und des Herausgebers stammen aus Kapitel 3.2.3 ‚Beantwortung der Subforschungsfrage FF3‘. Die Daten der Anwendbarkeit Wirkungskategorien – Use Case WKA werden nachfolgend in komprimierter Form in Tabelle 14 dargestellt, um die Übersicht zu verbessern.

Bepreisungsmethode	Ecotax	Ecovalue	Environmental Prices	EVR	LIME	Stepwise	Trucost
Wirkungskategorien mit hoher Anwendbarkeit für Use Case WKA							
Acidification	X	X	X	X		X	X
Climate Change	X	X	X	X	X	X	X
Depletion (Abiotic Resources)	X	X		(X)*	(X)*		
Depletion (Fossil Fuels)				X	X		
Depletion (Minerals)				X	X	X	
Ecotoxicity				X			
Ecotoxicity (Aquatic)						X	
Ecotoxicity (Freshwater)	X		X	(X)*		(X)*	
Ecotoxicity (Marine)	X	X	X	(X)*		(X)*	
Ecotoxicity (Terrestrial)	X		X	(X)*		X	
Eutrophication	X			X		(X)*	X
Eutrophication (Aquatic)**						X	
Eutrophication (Freshwater)**		X	X				
Eutrophication (Marine)**		X	X				X
Eutrophication (Terrestrial)**						X	
Human Toxicity	X	X	X	X		X	
Land Use	X		X	X	X	X	
Photochemical Oxidation	X	X	X	X	X	X	X
Anzahl Wirkungskategorien (primär)	10	6	8	6	3	6	4
Anzahl Wirkungskategorien (primär + sekundär)	10	6	8	10	4	9	4

*Die Bepreisungsmethode enthält diese Wirkungskategorie mit hoher Anwendbarkeit, welche sich aus enthaltenen ausgegrauten (**) Wirkungskategorien dieser Bepreisungsmethode zusammensetzt

**Wirkungskategorien (sekundär) der ausgegrauten Felder sind nicht explizit im Vergleichskriterium Anwendbarkeit Wirkungskategorien – Use Case WKA aufgeführt, jedoch von hoher Bedeutung für die Auswahl von Vor- und Nachteilen der einzelnen Bepreisungsmethoden dieses Vergleichskriteriums

Tabelle 14: Vergleich Bepreisungsmethoden – Kategorie Wirkungskategorien (komprimiert)

Vergleichskriterium	Geografischer Gültigkeitsbereich	Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren	Datenverfügbarkeit	Anwendbarkeit Wirkungskategorien Use Case WKA	Aktualität	Herausgeber
Bepreisungsmethode						
Ecotax	-	-	-	+	-	+
Ecovalue	-	+	+	-	-	+
EP	+	-	+	+	+	+
EVR	+	+	+	+	+	+
LIME	-	+	+	-	-	+
Stepwise	-	+ / -	+	+	-	+
Trucost	-	-	-	-	+	-

Tabelle 15: Vor- und Nachteile Bepreisungsmethoden nach Vergleichskriterien

4.4 Auswahl einer Bepreisungsmethode für den Use Case Windkraftanlage

Zu Beginn dieses Unterkapitels wird auf die Ergebnisse der Vor- und Nachteile der untersuchten Bepreisungsmethoden aus Tabelle 15 eingegangen, diese interpretiert und zugleich eine kritische Auswahl einer Bepreisungsmethode getroffen, welche für den in dieser Arbeit definierten Use Case WKA am besten geeignet ist. Anschließend wird auf die einzelnen Vergleichskriterien der ausgewählte Bepreisungsmethode eingegangen, um die Auswahl dieser Methode zu vertiefen.

Das Vergleichskriterium Anwendbarkeit Wirkungskategorien - Use Case WKA ist ein zentrales Vergleichskriterium und ergibt, dass die Methoden Ecovalue, LIME und Trucost zu wenige Wirkungskategorien berücksichtigen, welche in dem in dieser Arbeit betrachteten Use Case WKA von hoher Anwendbarkeit sind. Neben diesem Vergleichskriterium weisen sie ebenfalls vereinzelte Nachteile in den Vergleichskriterien Geografischer Gültigkeitsbereich, Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren, Datenverfügbarkeit, Aktualität und Herausgeber auf, weswegen diese drei Bepreisungsmethoden nicht ausgewählt werden. Das Vergleichskriterium Geografischer Gültigkeitsbereich der Methoden Ecotax und Stepwise wird für den in dieser Arbeit betrachteten Use Case ebenfalls als Nachteil angesehen. Zusätzlich weisen diese beiden Bepreisungsmethoden vereinzelte Nachteile in den

Vergleichskriterien Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren, Datenverfügbarkeit und Aktualität auf, weswegen diese beiden Bepreisungsmethoden nicht ausgewählt werden. Im direkten Vergleich der beiden verbleibenden Bepreisungsmethoden EP und EVR zeigt sich, dass die Vergleichskriterien Geografischer Gültigkeitsbereich, Datenverfügbarkeit, Anwendbarkeit Wirkungskategorien - Use Case WKA, Aktualität und Herausgeber bei beiden Methoden als Vorteil angesehen werden. Lediglich das Vergleichskriterium Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren unterscheidet sich und wird für die Methode EP als Nachteil, sowie für die Methode EVR als Vorteil angesehen. Anhand der Interpretation der Ergebnisse aus Tabelle 15 wird die Bepreisungsmethode Ecocost / Value Ratio (EVR) ausgewählt. Die Bepreisungsmethode EVR ist somit für den in dieser Arbeit definierten Use Case WKA am besten geeignet.

Um die Auswahl zu untermauern, werden die für die Vergleichskategorien relevanten Informationen der EVR Methode nochmals genannt. Der geografische Gültigkeitsbereich bezieht sich auf Europa, wobei die Berechnung der monetären Gewichtungsfaktoren zusätzlich auf die Situation der europäischen Union ausgelegt ist. Die Ermittlung der monetären Gewichtungsfaktoren basiert auf der Summe der Grenzvermeidungskosten während des Lebenszyklus eines Produkts (WtP). Die Datenverfügbarkeit ist sehr hoch und auf explizite Werte lässt sich über die Website des Herausgebers einfach zugreifen. Die Anwendbarkeit der Wirkungskategorien für den Use Case WKA ist mit 10 von 10 möglichen Wirkungskategorien sehr hoch, wobei weitere Wirkungskategorien berücksichtigt werden. Die Aktualität ist aufgrund der Überarbeitung der Methode im Jahre 2022 sehr hoch. Der Herausgeber ist eine gemeinnützige Stiftung, welche einen universitären (TU Delft) und wissenschaftlichen (Joost Vogtländer, Entwickler) Hintergrund besitzt.

5 Anwendung der Bepreisungsmethode EVR am Use Case Windkraftanlage

Um die Anwendung der Ecocost / Value Ratio (EVR) Bepreisungsmethode am spezifischen Use Case einer WKA darzustellen, wird in diesem Kapitel die Vorgehensweise einer beispielhaften Anwendung dieser Bepreisungsmethode vorgestellt. Ebenfalls wird auf nötige Schritte weiterer Methoden eingegangen, welche zum Verständnis der Anwendung der Bepreisungsmethode beitragen sollen. Wie bereits zuvor angemerkt werden sich nur auf die Ecocosts der Bepreisungsmethode, welche die ökologische Produktkette betrachtet, bezogen. Der Value, beziehungsweise das Value Ratio, welches die Wertschöpfungskette betrachtet, bleibt nachfolgend unberücksichtigt. Da die EVR Bepreisungsmethode auf der Methode der Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment (LCA)) basiert und bei der Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment (LCIA)) verwendet wird, um die Höhe der Umweltbelastung auf der Grundlage der Vermeidung dieser Belastung auszudrücken, wird ebenfalls auf das LCA eingegangen (Vogländer & Mestre, 2009, S. 1&3).

Ziel des LCA ist die Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, S. 9). Im ersten Schritt des LCA erfolgt die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Das Ziel sollte unter anderem die beabsichtigte Anwendung, die Gründe für die Durchführung der Studie und die angesprochene Zielgruppe enthalten. Spezifische Beispiele sind hierfür die Entscheidungshilfe für die Auswahl einer oder mehrere EoL Optionen, die Entwicklung von Unternehmensentscheidungen hin zu ökologisch nachhaltigeren Entscheidungen sowie die Entscheidungsträger innerhalb eines Unternehmens. Der Untersuchungsrahmen sollte darüber hinaus die Punkte wie das zu untersuchende Produktsystem, Annahmen, Einschränkungen und die Systemgrenzen enthalten. Spezifische Beispiele sind hierfür ein eindeutiges Windkraftanlagenmodell eines Herstellers samt Komponenten und Materialien, eine angenommene Recyclingrate gewisser Materialien bei einer gewissen EoL Option sowie eine beschränkte Auswahl der zu betrachtenden EoL Optionen. In Bezug auf die Systemgrenzen sollten bei der Festsetzung dieser unter anderem die Prozessmodule und Flüsse Transport, Erzeugung und Verwendung von Energieträgern, Verwertung gebrauchter Produkte und In- und Outputs der wesentlichen Verarbeitungsschritte berücksichtigt werden. So kann beispielsweise der Transport der demontierten WKA vom ursprünglichen Nutzungsstandort zum nächstgelegenen Recyclingstandort, der Bedarf des LKWs an Treibstoff pro transportiertem Kilometer, die Aufteilung der anzuwendenden EoL Optionen

(mechanisches und chemisches Recycling in Bezug zu Recover von GFK beziehungsweise CFK) sowie die Materialien und Energieträger zur Durchführung der EoL Option als Input und die entstehenden Produkte und Emissionen der EoL Option als Output festgelegt werden (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, S. 20-22)

Im zweiten Schritt Sachbilanzen (engl. Life Cycle Inventory (LCI)) werden die Datenerhebungen und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter In- und Outputflüsse eines Produktsystems durchgeführt. Die Daten können in Hauptgruppen zusammengefasst werden. Die erste Gruppe Energieinputs, Rohstoffinputs und andere physikalische Inputs kann beispielsweise den benötigten Treibstoff eines LKWs für den Transport, den benötigten Strom für den Betrieb eines Schredders des mechanischen Recyclings, die zu verarbeitenden Materialien der einzelnen Komponenten der WKA wie Stahl des Turms oder GFK / CFK der Rotorblätter sowie das für das chemische Recycling der Verbundstoffe benötigte Lösungsmittel enthalten. Die zweite Gruppe Produkte und Abfall kann beispielsweise recycelten Stahl, recycelte Fasern der Verbundstoffe, Energie durch die thermische Verwertung von Materialien sowie Reststoffe der thermischen Verwertung enthalten. Die dritte Gruppe Emissionen in die Luft, Einleitungen in Wasser und Verunreinigungen des Bodens kann beispielsweise den CO₂ Ausstoß durch die Nutzung fossiler Brennstoffe sowie das Zurücklassen des Fundaments im Boden enthalten. Die vierte Gruppe enthält weitere Umweltaspekte, welche durch die vorherigen drei Gruppen noch nicht abgedeckt wurden (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, S. 22&23).

Eine beispielhafte und stark vereinfachte Sachbilanz für die EoL Phase von Rotorblättern könnte wie in Abbildung 19 dargestellt sein. Als Input dienen die Rotorblätter und deren jeweilige Materialien. Ebenfalls wird die Demontage der Rotorblätter und deren Zerkleinerung in transportfähige Stücke berücksichtigt. Neben dem Transport werden auch der nötige Treibstoff sowie der Strom zur Betreibung der Maschinen und Transportmittel beachtet. In diesem Beispiel werden die drei EoL Optionen mechanisches Recycling, Recover und Deponierung betrachtet. Als Output ergeben sich recycelte Fasern und Reststoffe, Wärme beziehungsweise Strom durch die thermische Energiegewinnung sowie Emissionen der einzelnen Prozessschritte und deponierten Stoffe.

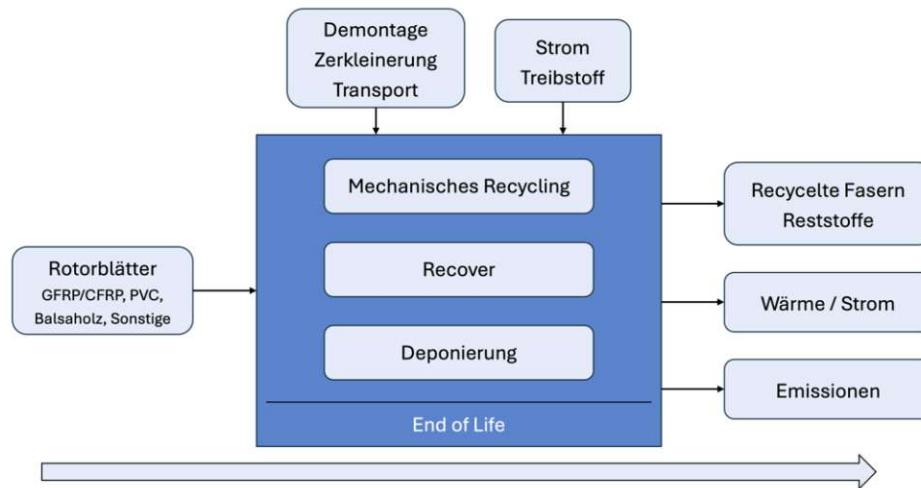


Abbildung 19: Beispielhafte Sachbilanz von Rotorblättern in EoL Phase

Im dritten Schritt Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment (LCIA)) wird die Beurteilung der Bedeutung potentieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Ergebnisse des LCI angestrebt. Im Allgemeinen werden die Daten des LCI mit spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft. Die EVR Bepreisungsmethode betrachtet die midpoint Wirkungskategorien Acidification, Climate Change, Depletion (Fossil Fuels), Depletion (Minerals), Depletion (Water), Ecotoxicity, Eutrophication, Human Toxicity, Land Use, Particulate Matter, Photochemical Oxidation und Uranium. Diese midpoint Wirkungskategorien decken alle Wirkungskategorien ab, welche aus Kapitel 4.3 'Vor- und Nachteile der identifizierten Bepreisungsmethoden in Bezug auf den Use Case Windkraftanlage' eine hohe Anwendbarkeit in Bezug auf den Use Case WKA besitzen. Die midpoint Wirkungskategorie Depletion (Abiotic Resources) ist nicht explizit vorhanden, wird jedoch durch die beiden Wirkungskategorien Depletion (Fossil Fuels) und Depletion (Minerals) abgedeckt. Ebenfalls sind die midpoint Wirkungskategorien Ecotoxicity (Freshwater), Ecotoxicity (Marine) und Ecotoxicity (Terrestrial) nicht explizit vorhanden, werden jedoch durch die Wirkungskategorie Ecotoxicity abgedeckt (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, S. 23&24). Neben den midpoint Wirkungskategorien bietet die Cumulative Energy Demand (CED) Methode, welche den Energiegehalt aller berücksichtigten Energiequellen quantifiziert, einen zusätzlichen Indikator zur Wirkungsabschätzung. Kasner (2022, S. 5) berücksichtigt in seiner Arbeit beispielsweise die fünf Energiekategorien nicht-erneuerbar (fossil), nicht-erneuerbar (nuklear), erneuerbar (Biomasse), erneuerbar (Wind, Sonne und Erdwärme) und erneuerbar (Wasser), ausgedrückt in Megajoule (MJ). Die Wirkungsabschätzung der ökologischen Umweltauswirkungen kann somit zusätzlich verbessert werden.

Um aus den ermittelten Werten der midpoint Wirkungskategorien einen monetären Wert zu erlangen, benötigt es einer Normalisierung der midpoint Wirkungskategorien. Bei der Normalisierung werden die midpoint Wirkungskategorien mit der

Verschmutzung in einem Land oder einer Region verglichen. Mit Hilfe der bereits in Kapitel 3.2.3.5 'EVR' beschriebenen Grenzvermeidungskosten findet die Normalisierung statt. Die bereits ermittelten Werte der midpoint Wirkungskategorien werden mit den ermittelten Grenzvermeidungskosten multipliziert, wodurch sich ein monetärer Wert für die einzelnen midpoint Wirkungskategorien ergibt. Diese werden dann wie in Abbildung 15 monetary endpoints genannt. Um aus den erhaltenen monetären Werten der midpoint Wirkungskategorien beziehungsweise den monetary endpoints einen einzelnen monetären Wert (Ecocosts) zu erlangen, benötigt es einer Gewichtung. Bei der Gewichtung wird jeder Wirkungskategorie ein Faktor zugeteilt, um die relative Bedeutung der Wirkungskategorie zu den restlichen Wirkungskategorien festzulegen. Bei der EVR Bepreisungsmethode ist lediglich die Normalisierung durchzuführen. Eine Gewichtung der einzelnen midpoint Wirkungskategorien beziehungsweise monetary endpoints ist bei dieser Bepreisungsmethode nicht nötig, wodurch das Gesamtergebnis die Summe der monetären Werte der midpoint Wirkungskategorien beziehungsweise monetary endpoints ist. Der somit erhaltene monetäre Wert (Ecocosts) beschreibt die kombinierten ökologischen Umweltauswirkungen und bietet eine schnelle und intuitive Einschätzung dieser Auswirkungen (Stichting Sustainability Impact Metrics, 2024a, 2024b).

Ebenfalls lassen sich durch die Anwendung der Bepreisungsmethode unterschiedliche Szenarien und Rahmenbedingungen miteinander vergleichen. Beispielsweise liefert der direkte Vergleich der EoL Optionen mechanisches Recycling, thermisches Recycling und Recover von Rotorblättern Aufschluss über die ökologisch günstigste Option und unterstützt Entscheidungsträger bei der Entscheidungsfindung. Zusätzlich können neben den prominenten Emissionen und Wirkungskategorien auch prominente normalisierte Wirkungskategorien identifiziert werden, wodurch die Verbindung von Wirkungskategorie und deren Grenzvermeidungskosten verdeutlicht wird. Ein weiterer Vorteil der EVR Bepreisungsmethode ist es, dass die Berechnungen gegenüber den schadensbasierten Methoden verhältnismäßig einfach und transparent sind. Außerdem können die Ergebnisse in einem standardisierten Geldwert und in zu treffenden Maßnahmen erklärt werden, wodurch das intuitive Verständnis der ökologischen Umweltauswirkungen und die Entscheidungsprozesse von Architekten, Geschäftsleuten, Planern, Ingenieuren und Entscheidungsträgern generell verbessert wird. Darüber hinaus können finanzielle Kosten durch mögliche politische und gesetzliche Maßnahmen von zu versteuernden Schadstoffen und Emissionen, wie beispielsweise der CO₂ Bepreisung, besser abgeschätzt werden. Ein Nachteil besteht jedoch darin, dass die Bepreisungsmethode nicht auf die Tatsache ausgerichtet ist, dass der Mensch seinen Konsum verringern sollte (Stichting Sustainability Impact Metrics, 2024a; Vogtländer & Mestre, 2009, S. 3).

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit stellt Abbildung 20 eine Zusammenfassung der durchzuführenden Schritte dar, welche zur Anwendung der EVR Bepreisungsmethode nötig sind.

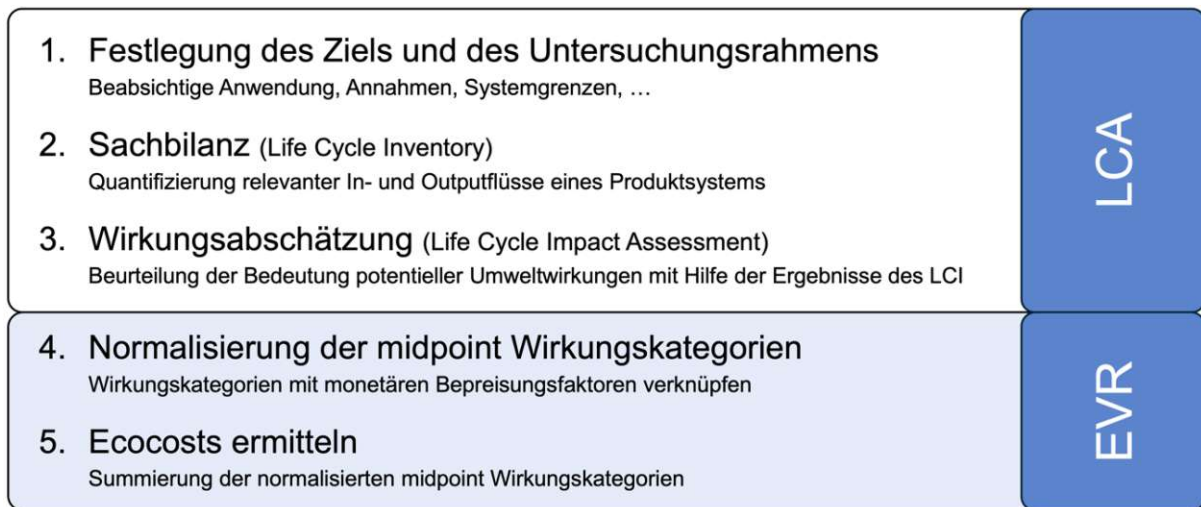


Abbildung 20: Übersicht Vorgehensweise EVR Bepreisungsmethode

Um die beschriebenen Schritte der Anwendung der Bepreisungsmethode weiter zu verdeutlichen, werden Teile eines LCA eines WKA-Herstellers und dessen expliziten Ergebnisse beispielhaft vorgestellt und verwendet. Nachfolgend wird sich auf den Bericht *'Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore EnVentus V162-6.2 MW Wind Plant'* von Mali und Garrett (2023) des Herstellers Vestas Wind Systems A/S bezogen. Im LCA von Mali und Garrett (2023, S. 27) werden die Produktlebensphasen Manufacturing, Wind Plant Setup, Site Operation und End-of-Life betrachtet. Als Ziel gilt es, die potenziellen ökologischen Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit der Stromerzeugung aus einem 100MW On-Shore-Windpark, bestehend aus sechzehn V162-6,2-MW-Windkraftanlagen, aus der Sicht des Lebenszyklus zu bewerten. In Bezug auf den Schritt der Sachbilanzen berücksichtigen Mali und Garrett (2023, S. 28) beispielsweise die EoL Optionen Recycle, Recover, Reuse und Deponierung und beziehen sich bei der geografischen Abdeckung auf ein europäisches Szenario. Die Anteile der EoL Optionen, nach denen die jeweiligen Materialien verarbeitet werden, werden auf Basis von vorhandenen Daten angenommen und für die Berechnung verwendet. So wird beispielsweise für Komponenten die aus einem Material bestehen, wie das Gusseisengehäuse der Gondel, 98% Recycling angenommen, während für Polymere 50% Recover und 50% Deponierung angenommen wird (Mali & Garrett, 2023, S. 32). Beim Schritt der Wirkungsabschätzung werden 14 midpoint Wirkungskategorien berücksichtigt, wovon 10 Stück aus der CML Methode stammen. Für jede Wirkungskategorie wird ein Gesamtwert errechnet, welcher sich aus den einzelnen Werten der jeweiligen Produktlebensphasen ergibt. Für diese Arbeit werden jedoch nur die Werte der End-of-Life Phase betrachtet. Die nachfolgende Tabelle 16 gibt einen Auszug der

berechneten Werte der berücksichtigten midpoint Wirkungskategorien des LCA von Mali und Garrett (2023) an. Die Einheiten sind in g oder mg pro kWh angegeben.

Midpoint Wirkungskategorie	Potential	Einheit	Wert
Acidification	Acidification Potential	mgSO ₂ e/kWh	-7,0
Climate Change	Global Warming Potential	gCO ₂ e/kWh	-3,2
Eutrophication	Eutrophication Potential	mgPO ₄ e/kWh	-0,31

Tabelle 16: Werte der Wirkungskategorien des LCA von Mali und Garrett (2023, S. 48) – EoL Phase

Grund für die negativen Werte der midpoint Wirkungskategorien in der EoL Phase ist die verringerte Metallproduktion von Eisen, Stahl, Kupfer und Aluminium durch das Recycling dieser Metalle. So ergibt sich beispielsweise ein negativer Wert für die Kategorie Acidification, da Schwefeldioxidemissionen durch das Recycling von Metallen vermieden werden (Mali & Garrett, 2023, S. 51). Um aus den Werten der Tabelle 16 auf die ökologischen Umweltauswirkungen einer einzelnen WKA zu schließen, werden folgende Informationen verwendet. Nach Mali und Garrett (2023, S. 26) besitzt die WKA eine Lebensdauer (L) von 20 Jahren. Ebenfalls liegt die Produktion einer WKA (P) bei 21.568 MWh pro Jahr, bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 7,4 m/s. Für die Produktion über die gesamte Lebensdauer einer WKA (P_{ges}) ergeben sich nach Formel 1 431.360 MWh beziehungsweise 431.360.000 kWh.

$$P_{ges} (MWh) = P \left(\frac{MWh}{Jahr} \right) * L (Jahre)$$

Formel 1: Produktion einer WKA über gesamte Lebensdauer

Die Werte der Wirkungskategorien pro kWh (W_{einz}) aus Tabelle 16 werden nun mit der Produktion über die gesamte Lebensdauer einer WKA (P_{ges}) multipliziert. Daraus ergeben sich die Werte der Wirkungskategorien über die gesamte Lebensdauer einer WKA (W_{ges}), welche in kg Schadstoff dargestellt werden. Hierfür wird Formel 2 verwendet.

$$W_{ges} (kg \text{ Schadstoff}) = P_{ges} (kWh) * W_{einz} \left(\frac{kg \text{ Schadstoff}}{kWh} \right)$$

Formel 2: Werte der Wirkungskategorien über gesamte Lebensdauer einer WKA

Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 dargestellt.

Midpoint Wirkungskategorie	Einheit	Wert
Acidification	kgSO ₂ e	-3.019,52
Climate Change	kgCO ₂ e	-1.380.352,00
Eutrophication	kgPO ₄ e	-133,72

Tabelle 17: Werte der Wirkungskategorien über gesamte Lebensdauer einer WKA

Um die in Tabelle 17 ermittelten midpoint Wirkungskategorien in einen monetären Wert umzuwandeln, beziehungsweise diese midpoint Wirkungskategorien zu normalisieren,

benötigt es monetäre Gewichtungsfaktoren, beziehungsweise Grenzvermeidungskosten. Die benötigten Faktoren der EVR Bepreisungsmethode werden für das Referenzjahr 2022 von Stichting Sustainability Impact Metrics (2024b) entnommen und in Tabelle 18 dargestellt.

Midpoint Wirkungskategorie	Einheit	Monetärer Gewichtungsfaktor
Acidification	€/kgSO ₂ e	8,75
Climate Change	€/kgCO ₂ e	0,116
Eutrophication	€/kgPO ₄ e	4,70

Tabelle 18: Grenzvermeidungskosten EVR-Methode - Referenzjahr 2022

Die Werte der Wirkungskategorien über die gesamte Lebensdauer einer WKA (W_{ges}) aus Tabelle 17 werden wie zuvor beschrieben mit Hilfe der Grenzvermeidungskosten beziehungsweise den monetären Gewichtungsfaktoren (G_{mon}) aus Tabelle 18 multipliziert und somit normalisiert. Das Ergebnis sind die normalisierten Wirkungskategorien (W_{norm}) beziehungsweise die monetary endpoints. Formel 3 wird hierfür verwendet.

$$W_{norm} (\text{€}) = W_{ges} (\text{kg Schadstoff}) * G_{mon} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg Schadstoff}} \right)$$

Formel 3: normalisierte Wirkungskategorien / monetary endpoints

Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt.

Midpoint Wirkungskategorie	Einheit	Wert
Acidification	€	-26.420,80
Climate Change	€	-160.120,83
Eutrophication	€	-628,49

Tabelle 19: normalisierte Wirkungskategorien / monetary endpoints

Um die Ecocosts (E) zu berechnen, werden die normalisierten Wirkungskategorien (W_{norm}) summiert. Formel 4 wird hierfür verwendet.

$$E (\text{€}) = \sum W_{norm} (\text{€})$$

Formel 4: Ecocosts

Die Ecocosts der EoL Phase dieses beispielhaften LCA, unter Berücksichtigung der drei Wirkungskategorien Acidification, Climate Change und Eutrophication, ergeben sich somit zu -187.170,12€. In anderen Worten konnten durch die Anwendung der EoL Optionen dieser WKA ökologische Umweltauswirkungen im Wert von 187.179,12€ eingespart werden. Es ist jedoch anzumerken, dass nur 3 der 14 Wirkungskategorien des betrachteten LCA verwendet wurden und die hier ermittelten Ecocosts nicht repräsentativ sind. Die durchgeführte Berechnung der Ecocosts dient lediglich zur Verdeutlichung der praktischen Anwendung und Vorgehensweise der EVR Bepreisungsmethode.

6 Evaluierung der Forschungsarbeit mittels Experteninterviews

Zu Beginn wird auf die in dieser Arbeit verwendete Methode des Experteninterviews, angelehnt an das Kapitel ‚Experteninterviews - Anwendung, Durchführung und Auswertung in der Politikwissenschaft‘ aus ‚Handbuch Methoden der Politikwissenschaft‘ von Wagemann et al. (2020), eingegangen. Ebenfalls werden die Vorgehensweise und weitere Informationen der in dieser Arbeit durchgeführten Interviews präsentiert. Abschließend werden die qualitativen Ergebnisse der Interviews vorgestellt und für die Evaluierung dieser Forschungsarbeit verwendet.

6.1 Methodik und Durchführung der Experteninterviews

Die für die Evaluierung dieser Forschungsarbeit herangezogene Methode ist das Experteninterview, angelehnt an Wagemann et al. (2020). Ziel des Experteninterviews ist es, Zugang zu Informationen zu erlangen, welche öffentlich nicht oder nur sehr begrenzt verfügbar sind, womit sich einem bis dahin weitgehend unerforschten Feld angenähert werden kann. Ebenfalls zielt die Methode auf das Wissen der Befragten und nicht auf ihre persönlichen Ansichten ab (Wagemann et al., 2020, S. 268). Anhand der erlangten Informationen wird anschließend eine Evaluierung dieser Forschungsarbeit durchgeführt.

Die Vorgehensweise des Experteninterviews nach Wagemann et al. (2020) wird in 5 Schritte unterteilt. Im ersten Schritt ‚Die Auswahl der Expertinnen und Experten‘ werden Ansprechpersonen ausfindig gemacht, welche die vermutlich relevanten Informationen über den Untersuchungsgegenstand besitzen. Im zweiten Schritt ‚Die Planung und Vorbereitung des Experteninterviews‘ sollen mittels Vorüberlegungen bezüglich der gezielten Auswahl der Ansprechpersonen, einer angemessenen Ansprache, einer geeigneten Interviewlänge, einer passenden Interviewatmosphäre, der Anonymität und des Datenschutzes die Experten zur Teilnahme bewegt werden. Im dritten Schritt ‚Der Leitfaden in Experteninterviews‘ wird ein Gesprächsleitfaden erstellt, wodurch das Interview hinsichtlich der Länge als auch inhaltlich abgegrenzt wird, ohne die Flexibilität zu beeinträchtigen. Im vierten Schritt ‚Das Führen von Experteninterviews‘ soll das Interview möglichst auf Augenhöhe, in einer angenehmen Gesprächsatmosphäre und von Seiten des Interviewers gut vorbereitet durchgeführt werden. Im fünften Schritt ‚Die Auswertung von Experteninterviews‘ werden die durch die Interviews erlangten Daten zuerst reduziert, dann reorganisiert und schlussendlich präsentiert.

Nachfolgend wird die Durchführung der Experteninterviews für diese Forschungsarbeit anhand der bereits beschriebenen 5 Schritte erläutert.

Die Auswahl der Experten erfolgt anhand deren Fachgebiete, welche für die Evaluierung dieser Forschungsarbeit möglichst vielseitig gewählt werden. Grund dafür ist der Versuch, mit Hilfe einer Triangulation der Datenquellen, die Verzerrungen der subjektiven Wahrnehmungen der Experten zu verringern und den Sachverhalt von verschiedenen Standpunkten zu beleuchten (Wagemann et al., 2020, S. 281-282). Experten der folgenden Fachgebiete nahmen schlussendlich an den Interviews teil: Energieerzeugung mittels WKA, Herstellung von WKA, Kreislaufwirtschaft und Finanzwirtschaft.

In Bezug auf die Planung und Vorbereitung der Experteninterviews werden Ansprechpersonen ausgewählt, welche den zuvor festgelegten Fachbieten entsprechen. Diese werden per E-Mail, sowie in einem einzelnen Fall persönlich, bezüglich ihrer Bereitschaft am Interview teilzunehmen, kontaktiert. Mit Hilfe personalisierter Anschreiben, welche jedoch die identischen Informationen wie einer Zusammenfassung des Themas, der Interviewlänge, den Terminvorschlägen, dem Ablauf des Interviews und des Interviewleitfadens enthalten, wird versucht die zu interviewenden Personen zur Teilnahme zu bewegen. Anhand des Ablaufs des Interviews, einer Zusammenfassung des Themas sowie dem Interviewleitfaden soll der Ansprechperson ein Überblick und besseres Einschätzen des Interviews ermöglicht werden. Die Interviewlänge wird auf 30 Minuten angesetzt, um detailliert genug auf das Themengebiet eingehen zu können, ohne wichtige Informationen zu vernachlässigen. Zusätzlich ist die Interviewlänge möglichst kurz gewählt, um den Aufwand zur Teilnahme am Interview gering zu halten. Von Anfang an wird das Interview in Form eines Online Meetings angeboten, um den zeitlichen Aufwand zu reduzieren und die Terminfindung zu erleichtern.

Der Leitfaden des Experteninterviews beinhaltet 5 Leitfragen (LFn), welche auf die Herangehensweise, Annahmen und Ergebnisse dieser Arbeit eingehen. Ziel ist es, anhand der gestellten Fragen neutrale und unvoreingenommene Daten zu erlangen, womit eine Evaluierung dieser Forschungsarbeit durchgeführt werden kann. Die Leitfragen lauten wie folgt:

- **LF1: „Sind Sie der Meinung, dass die Unterteilung einer Windkraftanlage in Komponenten und deren Materialien gegenüber der Windkraftanlage als gesamtes System für die Betrachtung der End-of-Life Optionen von Vorteil ist?“**
- **LF2: „Sind Sie der Meinung, dass die Identifikation der Bepreisungsmodelle anhand der durchgeführten systematischen Literaturrecherche ausreichend ist? Gibt es gegebenenfalls Bepreisungsmodelle die Ihrer Meinung nach vernachlässigt wurden?“**

- LF3: „Sind Sie der Meinung, dass die verwendeten Vergleichskriterien zur Auswahl des geeignetsten Bepreisungsmodells ausreichend und umfassend gewählt sind?“
- LF4: „Sind Sie der Meinung, dass die relevant erachteten midpoint Wirkungskategorien die ökologischen Umweltauswirkungen der End-of-Life Optionen einer Windkraftanlage umfassend abdecken?“
- LF5: „Ist Ihrer Meinung nach die Vorgehensweise und Auswahl eines bestehenden Bepreisungsmodells für den Use Case einer Windkraftanlage in dieser Arbeit ausreichend repräsentativ? Worin sehen Sie Stärken und/oder Schwächen?“

Das Informationsdokument, welches jedem Anschreiben beigelegt wurde und die eben genannten Informationen enthält, ist in Abbildung 21 und Abbildung 22 in Kapitel 13 ‚Anhang‘ dargestellt.

Die Durchführung der Interviews erfolgte an mehreren Tagen im Juli 2024 und August 2024. Zu Beginn der Interviews erfolgte eine Begrüßung und jeweilige Vorstellung der Teilnehmer. Anschließend wurde das Thema Datenschutz und Anonymität abgeklärt. So wurde die zu interviewende Person nach Erlaubnis gefragt, das Interview in Form einer Tonaufnahme festzuhalten. Ebenfalls wurde eine Anonymisierung der personenbezogenen Daten vorgeschlagen. Nachdem die organisatorischen Themen abgehandelt wurden, wurden die Herangehensweise, Annahmen und Ergebnisse dieser Forschungsarbeit mit Hilfe einer PowerPoint Präsentation vorgestellt. Daraufhin wurde das Interview begonnen, welches sich an dem Gesprächsleitfaden, inklusive der Leitfragen, orientierte. Nachdem das Interview beendet wurde, wurde sich für die Zeit und Expertise der interviewten Person bedankt und der Raum für weitere organisatorische Fragen und Feedback eröffnet. Abschließend erfolgten eine Verabschiedung und das Beenden des Termins. Um eine Übersicht der Durchführung der Interviews zu geben, dient Tabelle 20.

Fachgebiet der interviewten Person	Datum	Interviewort	Interviewdauer	Interviewer
Herstellung von WKA	15.07.2024	Online	50 min	Felix Gauss
Kreislaufwirtschaft	30.07.2024	Online	50 min	Felix Gauss
Energieerzeugung mittels WKA	20.08.2024	Online	40 min	Felix Gauss
Finanzwirtschaft	29.08.2024	Online	40 min	Felix Gauss

Tabelle 20: Experteninterviews – Übersicht Durchführung

Die Auswertung der Interviewdaten erfolgt in 3 Schritten. Im ersten Schritt werden die Daten reduziert. Dies erfolgt, indem Irrelevantes identifiziert und entfernt wird. Mit Hilfe von Vorannahmen lassen sich irrelevante Daten erkennen. Jedoch besteht die Gefahr, dass Daten vernachlässigt werden, welche einer Vorannahme nicht entsprechen, wodurch wichtige Aussagen und neue Erkenntnisgewinne verloren gehen. Daten, welche nicht direkt mit dem Thema dieser Forschungsarbeit und ebenfalls nicht zum Verständnis des Sachverhalts beitragen, werden entfernt. Im zweiten Schritt werden die Daten reorganisiert. Dies geschieht mit Hilfe der Zuordnung von Interviewpassagen in Klassen. Diese Klassen müssen erschöpfend und trennscharf gewählt werden. Erschöpfend bedeutet, dass alle relevanten Interviewpassagen einer Kategorie zugewiesen werden können. Trennscharf bedeutet, dass sich die Kategorien eindeutig voneinander unterscheiden. Für die Reorganisation der Daten, der in dieser Arbeit durchgeführten Experteninterviews, werden folgende Kategorien gewählt: Windkraftanlage, EoL Optionen, Vergleichskriterien der Bepreisungsmodelle, Wirkungskategorien, Bepreisungsmodelle, Feedback und Sonstiges. Im dritten Schritt werden die Daten präsentiert und zur Evaluierung dieser Forschungsarbeit herangezogen. Dies geschieht im nachfolgenden Kapitel 6.2 ‚Ergebnisse der Experteninterviews‘.

6.2 Ergebnisse der Experteninterviews

In diesem Kapitel werden die Daten der durchgeführten Experteninterviews präsentiert. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, werden die Ergebnisse an die Leitfragen LF1 bis LF5 angelehnt.

In Bezug auf LF1 und die Unterteilung einer WKA ist zu erkennen, dass alle Experten eine Unterteilung in Komponenten und Materialien als sinnvoll erachten. EoL Optionen werden meist auf einzelne Komponenten und identische Materialien angewendet, wodurch eine Betrachtung einer WKA als System für diese Forschungsarbeit weniger sinnvoll ist. Für Stakeholder und Recycler spielt der ökonomische Wert sowie der technische Zustand einzelner Komponenten und Materialien eine wichtige Rolle. Häufig werden EoL Optionen anhand dieser Kriterien ausgewählt, wodurch die in dieser Arbeit betrachtete Unterteilung einer WKA zusätzlich bestätigt wird. Angesichts des in dieser Arbeit verwendeten Detailgrades der Materialaufteilung der Komponenten einer WKA ist dieser für einen Experten nicht ausreichend hoch. Auch Materialien und Stoffe mit geringerem Massenanteil sollten detailliert aufgeführt werden. Ökologisch hoch relevante Stoffe wie Schwefelhexafluorid (SF₆), welches als Isolierstoff in Schaltanlagen dient und 32.500-mal klimaschädlicher ist als Kohlenstoffdioxid (CO₂), sollten trotz ihres geringen Massenanteils explizit aufgeführt werden (EnBW Energie Baden-Württemberg AG, 2023).

In Bezug auf LF2 und die Identifikation der Bepreisungsmodelle ist zu erkennen, dass die Systematische Literaturrecherche (SLR) als ausreichend umfänglich und nachvollziehbar angesehen wird. Die Qualität der SLR wird anhand der Berücksichtigung von 3 Datenbanken, der Verwendung von 4 Suchschwerpunkten und der anschließenden Bewertung der relevanten Literaturen als hochwertig angesehen und bestätigt. Eine Lücke der SLR wird hinsichtlich der unberücksichtigten Literaturen, welche nicht in deutscher oder englischer Sprache publiziert wurden, angemerkt. Kein Experte nannte eine weitere Bepreisungsmethode, welche durch die SLR unberücksichtigt blieb. Dem Experten des Fachgebiets Finanzwirtschaft waren alle Bepreisungsmethoden ein Begriff.

In Bezug auf LF3 und die Vergleichskriterien ist zu erkennen, dass die Auswahl der Vergleichskriterien von den Experten als umfassend angesehen wurde. Die 6 entwickelten Vergleichskriterien decken die Anforderungen des betrachteten Use Case angemessen ab. Ein Erweiterungspotential der Vergleichskriterien wurde hinsichtlich einer Gewichtung der einzelnen Kriterien zueinander von einem Experten angemerkt. Der Experte des Fachgebiets Finanzwirtschaft hingegen sieht eine Gewichtung der Vergleichskriterien verpflichtend, um die Auswahl der geeignetsten Bepreisungsmethode überhaupt treffen zu können. Eine einheitliche Gewichtung der Vergleichskriterien ist seiner Meinung nach nicht realitätsgetreu, da einzelne Vergleichskriterien stets mehr oder weniger wichtig zu betrachten sind. Die Komplexität der Auswahl der geeignetsten Bepreisungsmethode würde somit zusätzlich steigen, jedoch die Spezifizierung an den jeweiligen Use Case erhöhen.

In Bezug auf LF4 und der als relevant erachteten midpoint Wirkungskategorien ist zu erkennen, dass diese für den Use Case WKA nahezu vollständig als solches betrachtet werden. So wird beispielsweise die Wirkungskategorie Climate Change ebenfalls als relevant erachtet, da WKA einen hohen Anteil an Materialien wie Stahl und Beton enthalten, welche hohe CO₂ Emissionen im Erzeugungsprozess verursachen. Durch angewendete EoL Optionen und den damit verbundenen Emissionseinsparungen der Erzeugungsprozesse von Primärressourcen, besitzen diese Materialien eine hohe Relevanz für die in dieser Arbeit betrachtete EoL Phase. Ebenfalls wird die Wirkungskategorie Depletion of Abiotic Resources als relevant erachtet. Eine WKA enthält große Rohstoffmengen, wodurch ein hoher Einfluss auf diese Wirkungskategorie entsteht. Ein Experte führt aus, dass bei Umweltverträglichkeitsprüfungen von WKA und Windparks detaillierte Berechnungen durchgeführt werden, welche bis zur Berechnung des Kots und Urins der Arbeitskräfte am Standort über den Zeitraum der Arbeitsaufträge reicht. Die Relevanz der Wirkungskategorie Eutrophication wird somit bestätigt. Außerdem wird die Wahl der relevanten Wirkungskategorien als sinnvoll erachtet, da somit ökologische Umweltauswirkungen unterschiedlicher WKA Typen und WKA Herstellern, sowie unterschiedlicher EoL Optionen, umfänglich berücksichtigt werden. In Bezug auf die

Wirkungskategorie Land Use herrscht Uneinigkeit. Die Experten der Fachgebiete WKA Hersteller und Energieerzeuger durch WKA sehen diese Wirkungskategorie als unnötig an, da sich auf WKA bezogen wird, welche rückgebaut werden und somit die Fläche wieder für eine weitere Nutzung freigesetzt wird. Im Gegenzug betrachtet der Experte des Fachgebiets Kreislaufwirtschaft die Wirkungskategorie als relevant, da für gewählte EoL Optionen immer eine Fläche genutzt wird. Beispielsweise werden Maschinen und Räumlichkeiten für die Durchführung der EoL Optionen benötigt, wodurch das darunterliegende Land nicht weiter nutzbar ist. Neben den berücksichtigten Wirkungskategorien wird der Wasserverbrauch von einem Experten vermisst. Grund ist die Verwendung von Frischwasser in einer Vielzahl von Prozessen der möglichen EoL Optionen. Außerdem ist die Ressourcenverfügbarkeit von Frischwasser zunehmend kritischer zu betrachten. Darüber hinaus wird auf eine Lücke der Wirkungskategorien hingewiesen, welche eine Belästigung der Anwohner durch Rückbauarbeiten und den dazugehörigen Fahrzeugen und Gerätschaften nicht berücksichtigt. Lärmbelästigung durch Fahrzeuge im direkten Umfeld des WKA Standorts selbst, sowie umliegende Zufahrtsstraßen, können eine hohe Belastung der Anwohner auslösen. Stilllegungen von Windparks können über mehrere Monate andauern. Die Wirkungskategorie Nuisance wird folglich von einem Experten gefordert.

In Bezug auf LF5 und der allgemeinen Vorgehensweise samt Ergebnissen wurde von den Experten rückgespiegelt, dass diese transparent, schlüssig, ausreichend detailliert und für den Use Case einer WKA repräsentativ sind. Eine eindeutige Stärke stellt laut den Experten die SLR dar, welche durch ihren Umfang und ihre Dokumentation ein solides Fundament der Arbeit bildet. Laut dem Experten des Fachgebiets Finanzwirtschaft ist die Auswahl der geeignetsten Bepreisungsmethode mit Hilfe der Vergleichskriterien sehr wertvoll. Über die Kriterien und der vorgeschlagenen Gewichtung können Schwerpunkte und Risiken dynamisch betrachtet werden. Ebenfalls kann durch die Anwendung der Vergleichskriterien eine Fehlerabschätzung der monetären Gewichtungsfaktoren erreicht werden. Hohe Schwankungsbreiten der monetären Gewichtungsfaktoren der Bepreisungsmodelle von identischen Wirkungskategorien zueinander werden als nachteilig angemerkt. Als Schwäche wurde das Vernachlässigen von nicht deutscher beziehungsweise englischer Literatur in der SLR und den damit verbundenen Verlust an relevanten Informationen abermals genannt. Eine weitere Schwäche, welche von einem Experten genannt wurde, ist das fehlende Vorhandensein von Richtlinien und standardisierten Vorgehensweisen zur Erstellung von Bepreisungsmethoden und deren Auswahl. Trotz einer transparenten Dokumentation der Vorgehensweise, zur Auswahl einer Bepreisungsmethode in dieser Arbeit, ist diese nicht generalisiert. Eine direkte Anwendung dieser Vorgehensweise für abweichende Use Cases würde nicht zwangsläufig repräsentative Ergebnisse liefern.

Die Durchführung der Online Meetings mit den Experten, inklusive der anfänglichen Präsentation der Vorgehensweise und des nachfolgenden Interviews, wurde positiv und professionell bewertet. Ein fachlicher Austausch auf Augenhöhe konnte in den geführten Interviews erreicht werden. Ein Experte merkte ergänzend an, dass die Einleitung, Problemstellung und Hinleitung zum Forschungsthema weiter vereinfacht werden sollte, um fachfremde Personen thematisch besser abholen zu können.

7 Diskussion und Ausblick

Zu Beginn dieses Kapitels werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst dargestellt und diskutiert. Anschließend wird auf die Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse dieser Arbeit eingegangen. Zum Schluss erfolgt ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen dieser Arbeit.

7.1 Diskussion der Ergebnisse

Das Ergebnis dieser Arbeit ist die Identifizierung einer Bepreisungsmethode, welche sich aus einer Menge von betrachteten Bepreisungsmethoden am besten zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life (EoL) Optionen an Windkraftanlagen (WKA) anwenden lässt. Die hierbei identifizierte Methode ist die Ecocost / Value Ratio (EVR) Bepreisungsmethode, welche anhand eines zuvor definierten Use Case und entwickelten Vergleichskriterien ausgewählt wird. Der Use Case bezieht sich auf Modell- und Hersteller-unspezifische On-Shore WKA, welche in Österreich errichtet wurden und nun einer Stilllegung unterzogen werden. Ebenfalls wird die WKA in Komponenten und Materialien betrachtet, sowie die in dieser Arbeit identifizierten technisch möglichen EoL Optionen berücksichtigt. Der Untersuchungsrahmen für diesen Use Case beginnt ab dem Zeitpunkt der Demontage der WKA, beinhaltet unter anderem Transporte der Materialien und Komponenten und der Durchführung der jeweiligen EoL Optionen, und endet mit der abschließenden Verarbeitung der Materialien und Komponenten der verwendeten EoL Optionen. Die entwickelten Vergleichskriterien zur Identifikation einer Bepreisungsmethode sind Geografischer Gültigkeitsbereich, Ermittlung monetäre Gewichtungsfaktoren, Datenverfügbarkeit, Qualität Wirkungskategorien, Aktualität und Herausgeber. Vorab definierte Werte der Vergleichskriterien bestimmen einen Vor- oder Nachteil einer Bepreisungsmethode. Die Werte bilden sich größtenteils aus dem zuvor definierten Use Case und sind somit stark von diesem abhängig.

Wendet man die identifizierte Bepreisungsmethode am spezifischen Use Case an, ergibt sich ein monetärer Wert für die in der Bepreisungsmethode berücksichtigten ökologischen Umweltauswirkungen der betrachteten EoL Option. Dieses Ergebnis kann anschließend genutzt werden, um die Produktions- und Verbrauchsentscheidungen in eine umweltfreundlichere Richtung zu lenken (Remeur, 2020, S. 1), sowie unterschiedliche EoL Optionen und Szenarien anhand der monetarisierten ökologischen Umweltauswirkungen miteinander zu vergleichen. Ebenfalls entsteht durch das Ausdrücken der ökologischen Umweltauswirkungen in einem standardisierten Geldwert der Vorteil, dass dieser instinktiv leicht zu verstehen ist (Vogtländer & Mestre, 2009, S. 3), wodurch die Kommunikation der Ergebnisse vereinfacht wird. Vorsicht ist jedoch beim Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher

Bepreisungsmethoden geboten, da Berechnungsgrundlagen sowie berücksichtigte ökologische Umweltauswirkungen unterschiedlicher Bepreisungsmethoden voneinander abweichen können. Ein direkter Vergleich ist somit nicht möglich. Es ist daher darauf zu achten Annahmen, Rahmenbedingungen, Datenherkunft sowie Berechnungen transparent und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Um die Bepreisungsmethode anwenden zu können werden spezifische Daten benötigt wie bspw. das genaue Modell der WKA inklusive der spezifischen Komponenten, Materialien sowie deren Massenanteile, der exakte Standort der WKA oder die einzelnen Prozessschritte der zu berücksichtigenden EoL Optionen. Es ist somit eine vorgelagerte Informationsbeschaffung nötig, welche in dieser Arbeit nur zum Teil und oberflächlich beschrieben wurde. Die Qualität dieser Daten hat direkten Einfluss auf die Ergebnisse der Bepreisungsmethode und muss stets umfänglich und kritisch betrachtet werden, da diese mit Unsicherheiten behaftet sind. Der Nutzer sollte sich dessen bewusst sein, wenn er die Ergebnisse analysiert und verwendet, insbesondere wenn er sich auf absolute Werte bezieht (Ahlroth & Finnveden, 2011, S. 2000).

Die Basis dieser Arbeit stellt eine systematische Literaturrecherche (SLR) mit 4 Suchschwerpunkten in den Datenbanken Scopus (SC), ScienceDirect (SD) und Google Scholar (GS) dar. Eine Anzahl von 5.082 angezeigten Treffern, 407 durchsuchten Treffern und 85 effektiv relevanten Literaturen wurden in dieser SLR identifiziert. Die SLR dient der Beantwortung der gestellten Subforschungsfragen (FFx) sowie der Ermittlung existierender Bepreisungsmethoden. Eine hohe Transparenz und Nachvollziehbarkeit der berücksichtigten Literaturen der SLR wird durch die qualitative Bewertung der effektiv relevanten Literaturen erreicht, welche die 6 Bewertungskategorien Transparenz, Design, Vielseitigkeit, Generalisierbarkeit, Originalität und Verwertbarkeit verwendet. Von den 85 als effektiv relevanten Literaturen wurden 35 Literaturen (inklusive Doppelungen durch FF1 und FF2 & FF3) in dieser Arbeit verwendet, 38 Literaturen auf Grund einer zu geringen Bewertung nicht berücksichtigt und 12 Literaturen auf Grund einer nicht direkten Beantwortung der FFx ausgeschlossen. Eine hohe Qualität der durchgeführten SLR wurde zusätzlich in mehreren Experteninterviews bestätigt. Es ist jedoch anzumerken, dass in der SLR auf 6 Literaturen kein Zugriff erlangt werden konnte. Zusätzlich mussten im Verlauf dieser Forschungsarbeit weitere Literaturen vernachlässigt werden, da keine Versionen in deutscher oder englischer Sprache verfügbar waren. Es ist sehr wahrscheinlich, dass vereinzelt wichtige Informationen demzufolge unberücksichtigt bleiben. In Bezug auf die Veröffentlichungsjahre der bewerteten Literaturen ist zu erkennen, dass die Anzahl der Veröffentlichungen seit 2014 stetig anstieg und das Interesse an diesem Forschungsschwerpunkt in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen hat, beginnend mit dem Jahr 2019. Da die SLR im Dezember 2023 und Januar 2024 durchgeführt wurde entspricht der Stand der Forschung diesem Zeitraum. Eine weitere wichtige Erkenntnis der SLR ist die identifizierte Forschungslücke in

Bezug auf das Nichtvorhandensein der Verknüpfung von ökologischen Umweltauswirkungen einer WKA in der EoL Phase mit einem Bepreisungsmodell. Diese Erkenntnis bestätigt zusätzlich den Bedarf dieses Forschungsaufwands.

In Bezug auf die Experteninterviews und die Evaluierung der Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Arbeit wurden zufriedenstellende Resultate erzielt. Der Interviewleitfaden samt 5 Leitfragen ist umfänglich aufgebaut und deckt alle wichtigen Schwerpunkte dieser Arbeit ab, um eine ausreichend umfängliche Evaluierung durchführen zu können. Annahmen wie die Betrachtung einer WKA in Komponenten und Materialien wurden als sinnvoll erachtet, während ebenfalls auf Lücken wie die vernachlässigten Wirkungskategorien Water Use und Nuisance hingewiesen wurde. Die hohen Schwankungsbreiten der monetären Gewichtungsfaktoren der Bepreisungsmodelle von identischen Wirkungskategorien zueinander führen zu Unsicherheiten, welche sich auf die Interpretation der Ergebnisse auswirkt. Aufgrund des Umfangs und des zeitlichen Rahmens einer Diplomarbeit ist die Anzahl auf 4 Experten und Interviews begrenzt. Die unterschiedlichen Fachgebiete der einzelnen Experten Energieerzeugung mittels WKA, Herstellung von WKA, Kreislaufwirtschaft und Finanzwirtschaft decken einen breiten fachlichen Bereich ab. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die fachliche Expertise der Interviewpartner mehr auf dem Schwerpunkt WKA und weniger auf dem Schwerpunkt Bepreisungsmodelle lag.

7.2 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

Die Vorgehensweise zur Identifizierung der geeignetsten Methode zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von EoL Optionen an WKA bezieht sich auf den zuvor definierten Use Case. Werte der Vergleichskriterien, welche einen Vor- oder Nachteil der betrachteten Bepreisungsmethode definieren, basieren auf die durch den Use Case gestellten Anforderungen. Aus diesem Grund lassen sich die Werte der Vergleichskriterien, sowie die Vergleichskriterien selbst, nicht direkt auf einen abweichenden Use Case übertragen. Diese Einschränkung würde bei einer Anwendung der beschriebenen Vorgehensweise, der entwickelten Kriterien und zugehörigen Werten bei einem abweichenden Use Case zu Unsicherheiten führen. Die Vorgehensweise dieser Arbeit ist somit nicht universell anwendbar.

Eine weitere Einschränkung dieser Arbeit ist die nur oberflächliche Betrachtung der Ermittlung der monetären Gewichtungsfaktoren. Mathematische Modelle und Datensätze, auf welchen die monetären Gewichtungsfaktoren basieren, wurden auf Grund des Arbeitsaufwandes einer Diplomarbeit nicht im Detail überprüft. Die detaillierte Vergleichbarkeit der zugrundeliegenden Berechnungsmodelle der unterschiedlichen Bepreisungsmethoden miteinander wurde in dieser Arbeit vernachlässigt. In Bezug auf die für die Berechnung der beispielhaften Ecocosts verwendeten Werte der Wirkungskategorien in Kapitel 5 „Anwendung der

Bepreisungsmethode EVR am Use Case Windkraftanlage' ist anzumerken, dass diese aus der Literatur des Herstellers übernommen wurden. In diesem Zusammenhang erfolgte keine zusätzliche Überprüfung der Qualität dieser Werte. Ebenfalls stellt die beispielhafte Berechnung der Ecocosts kein Ergebnis dar, welches für eine Entscheidungsfindung herangezogen werden sollte. Es wurden nicht alle relevanten Wirkungskategorien berücksichtigt, weswegen das Ergebnis nicht umfänglich ist.

Bezogen auf den Umfang der durchgeführten Experteninterviews ist zu sagen, dass die Anzahl der Experten sehr gering ist. Da die erlangten Daten von Experteninterviews die Summe von subjektiven Wahrnehmungen zum Sachverhalt sind, besteht bei einer sehr geringen Anzahl an Experten die Gefahr, dass sich die Verzerrungen der subjektiven Wahrnehmungen nicht ausgleichen und Zufallsfehler entstehen können (Wagemann et al., 2020, S. 281&282).

7.3 Ausblick

Die in dieser Arbeit identifizierte EVR Bepreisungsmethode wurde für den Use Case einer Modell- und Hersteller-unspezifischen On-Shore WKA, welche in Österreich errichtet wurde und nun einer Stilllegung unterzogen wird, erstellt. Weiterführend könnte die in dieser Arbeit vorgestellte beispielhafte Berechnung erweitert werden und an einer spezifischen On-Shore WKA in Österreich, mit spezifischen EoL Optionen und unter Berücksichtigung von Transporten und Infrastruktur angewendet werden. Ebenfalls könnten alle als relevant erachteten Wirkungskategorien identifiziert und berechnet werden, wodurch die finalen Ecocosts die ökologischen Umweltauswirkungen des Use Case noch umfänglicher beschreiben. Nagle et al. (2020) vergleicht beispielweise die Umweltauswirkungen der derzeitigen potenziellen Entsorgungsmethoden für Rotorblätter des Modells Vestas V52 irischer WKA, unter Berücksichtigung spezifischer Materialanteile, Transportwege inklusive des Transportmittels sowie einer Substitutionsrate von Rohmaterialien.

Eine Verknüpfung der Bepreisungsmethode der ökologischen Umweltauswirkungen mit einem ökonomischen Betrachtungsmodell, wie beispielsweise von Ramírez et al. (2022) welches mit Hilfe von technischen und ökologischen Inputvariablen die ökonomische Performance eines EoL Projekts spanischer WKA ermittelt, könnte einen weiterführenden Forschungsaufwand darstellen. Durch eine ökonomische sowie zugleich eine ökologische Betrachtung möglicher EoL Optionen könnten Wechselwirkungen zwischen Profit und Nachhaltigkeit besser identifiziert werden. Folglich könnten Entscheidungsträger umfassendere Entscheidungen treffen.

In Bezug auf die Nachverfolgung der Kreislaufhäufigkeit eines Materials oder einer Komponente innerhalb der Kreislaufwirtschaft könnten weitere Forschungsschwerpunkte gesetzt werden. Die Anzahl der durchlaufenen Zyklen eines Materials oder einer Komponente haben große Auswirkungen auf das Verhältnis

zwischen den verursachten Emissionen über die gesamte Lebensdauer und der beziehungsweise den Nutzungsphase(n).

8 Literaturverzeichnis

- Abdessalem, M., Hadj-Alouane, A., & Riopel, D. (2012). Decision modelling of reverse logistics systems: Selection of recovery operations for end-of-life products. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 13, 139-161. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2012.048933>
- Ahlroth, S., & Finnveden, G. (2011). Ecovalue08—A new valuation set for environmental systems analysis tools. *Journal of Cleaner Production*, 19(17-18), 1994-2003. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.005>
- Ai, X., Pei, Z., Cao, J., Zhu, X., Hu, W., Gao, L., Feng, D., & Yi, J. (2023). Environmental impact assessment of recycled HMA with RAP materials from the rotary decomposition process compared to virgin HMA and conventional recycled HMA. *Journal of Cleaner Production*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136078>
- Amadei, A. M., De Laurentiis, V., & Sala, S. (2021). A review of monetary valuation in life cycle assessment: State of the art and future needs. *Journal of Cleaner Production*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129668>
- Andersen, N. (2015). *Wind turbine end-of-life: Characterisation of waste material* University of Gävle].
- Andersen, N., Eriksson, O., Hillman, K., & Wallhagen, M. (2016). Wind Turbines' End-of-Life: Quantification and Characterisation of Future Waste Materials on a National Level. *Energies*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/en9120999>
- André, A., Magdalena, J., Cecilia, M., Georgi, N., & Haghani, R. (2022). The Re-use of End-of-Life Fiber Reinforced Polymer Composites in Construction. In *10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering* (pp. 1183-1195). https://doi.org/10.1007/978-3-030-88166-5_103
- Arendt, R., Bachmann, T. M., Motoshita, M., Bach, V., & Finkbeiner, M. (2020). Comparison of Different Monetization Methods in LCA: A Review. *Sustainability*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/su122410493>
- Bahadir, M., & Angerhöfer, D. (1995). *Springer Umweltlexikon : mit 724 Formeln und 283 Tabellen*. Berlin [u.a.] : Springer. <https://permalink.catalogplus.tuwien.at/AC00678117>
- Bakar, M. S. A., & Rahimifard, S. (2008). Ecological and economical assessment of end-of-life waste recycling in the electrical and electronic recovery sector. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), 261-277. <https://doi.org/10.1080/19397030802576825>
- Baumol, W. J., & Oates, W. E. (1971). The Use of Standards and Prices for Protection of the Environment. *The Swedish Journal of Economics*, 73(1), 42-54. <https://doi.org/10.2307/3439132>
- Bickel, P., & Friedrich, R. (2005). *ExternE - Externalities of Energy - Methodology 2005 Update*. Office for Official Publications of the European Communities.
- Bonciu, F. (2014). The European economy: From a linear to a circular economy. *Romanian Journal of European Affairs*, 14(4), 78 - 91.
- Bruton, J., Potočník, J., Rehn, O., & Tajani, A. (2012). *Manifesto For A Resource-Efficient Europe*.
- Buchberger, S., Hofbauer, G. n., Mangold, L., & Truong, K. (2019). Das Konzept der Circular Economy als Maxime für Beschaffung und Vertrieb in der Industrie. *Arbeitsberichte – Working Papers*, 46.
- Bünger, B. r., & Matthey, A. (2018). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Methodische Grundlagen*. Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

- Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus. (2023). *Definition of ,Pricing'*. Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus. Retrieved 17.11.2023 from <https://dictionary.cambridge.org/de/worterbuch/englisch/pricing>
- Chikha, I., Bouzidi, Y., Tazi, N., Baklouti, S., & Idir, R. (2022). *Comparative study between different valorization methods of glass fiber waste from end-of-life wind turbine blades* 13th International Renewable Energy Congress (IREC),
- Cinar, S. (2021). Sustainable reverse logistic network design for end-of-life use-case study. *RAIRO - Operations Research*, 55, S503-S521. <https://doi.org/10.1051/ro/2019069>
- Cinar, S., & Yildirim, M. B. (2017). Reverse Logistic Network Design for End-of-Life Wind Turbines. In *Optimization and Dynamics with Their Applications* (pp. 225-256). https://doi.org/10.1007/978-981-10-4214-0_11
- 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>
- Crocker, R., Saint, C., Chen, G., & Tong, Y. (2018). *Unmaking Waste in Production and Consumption: Towards the Circular Economy*. <https://doi.org/10.1108/9781787146198>
- De Bruyn, S., Ahdour, S., Bijleveld, M., De Graaff, L., Schep, E., Schroten, A., & Vergeer, R. (2018a). *Environmental Prices Handbook 2017 - Methods and numbers for valuation of environmental impacts*. CE Delft.
- De Bruyn, S., Ahdour, S., Bijleveld, M., De Graaff, L., Schep, E., Schroten, A., & Vergeer, R. (2018b). *Environmental Prices Handbook - EU28 version*. CE Delft.
- De Bruyn, S., De Vries, J., Juijn, D., Bijleveld, M., Van der Giesen, C., Korteland, M., Van Santen, W., & Pápai, S. (2023). *Handboek Milieuprijzen 2023 - Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts*. CE Delft.
- De Nocker, L., & Debacker, W. (2018). *Annex: Monetisation of the MMG method (update 2017)*. D. Wille.
- 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). <https://doi.org/10.3390/su151612557>
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2021a). DIN EN ISO 14040:2021-02. In *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020* (pp. 36).
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2021b). DIN EN ISO 14044:2021-02. In *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020* (pp. 66).
- Eldh, P. (2003). *Ecotax02 : An update of a Life Cycle Assessment weighting method with a case study on waste management* (Publication Number 2003:12) [Student thesis, Königliche Technische Hochschule KTH]. DiVA. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-32528>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards The Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*.

- EnBW Energie Baden-Württemberg AG. (2023). *Windkraftanlagen bald ohne SF₆ und noch umweltfreundlicher?* Retrieved 21.08.2024 from <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/sf6-in-windraedern.html>
- Europäische Kommission. (2014). *Hin zu einer Kreislaufwirtschaft: Ein Null-Abfallprogramm für Europa.*
- Europäisches Parlament, & Rat der Europäischen Union. (2009). *VERORDNUNG (EG) Nr. 1221/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001, sowie der Beschlüsse der Kommission 2001/681/EG und 2006/193/EG.*
- Ewing, B., Moore, D., Goldfinger, S., Oursler, A., Reed, A., & Wackernagel, M. (2010). *The Ecological Footprint Atlas 2010.* G. F. Network.
- Faith, D. O., & Edwin, A. M. (2014). A Review of The Effect of Pricing Strategies on The Purchase of Consumer Goods. *International Journal of Research in Management, Science & Technology*, 2(2).
- Fetter, F. A. (1912). The Definition of Price. *The American Economic Review*, 2(4), 783-813. <https://www.jstor.org/stable/1828191>
- Finnveden, G. r., Eldh, P., & Johansson, J. (2006). Weighting in LCA Based on Ecotaxes - Development of a Mid-point Method and Experiences from Case Studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(S1), 81-88. <https://doi.org/10.1065/lca2006.04.015>
- Finnveden, G. r., Håkansson, C., & Noring, M. (2013). *A NEW SET OF VALUATION FACTORS FOR LCA AND LCC BASED ON DAMAGE COSTS – ECOVALUE 2012* International Conference on Life Cycle Management, Gothenburg.
- Frischknecht, R., Wyss, F., Büsser Knöpfel, S., Lützkendorf, T., & Balouktsi, M. (2015). Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(7), 957-969. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0897-4>
- Garcia-Velasquez, C., & van der Meer, Y. (2023). Mind the Pulp: Environmental and economic assessment of a sugar beet pulp biorefinery for biobased chemical production. *Waste Manag*, 155, 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.038>
- Garrett, P., & Rønde, K. (2011). *Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V90-2.0MW Gridstreamer Wind Plant.* Vestas Wind Systems A/S.
- 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>
- Giljum, S., Behrens, A., Hinterberger, F., Lutz, C., & Meyer, B. (2008). Modelling scenarios towards a sustainable use of natural resources in Europe. *Environmental Science & Policy*, 11(3), 204-216. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.07.005>
- Greenfeld, A., Becker, N., Bornman, J. F., Spatari, S., & Angel, D. L. (2021). Monetizing environmental impact of integrated aquaponic farming compared to separate systems. *Sci Total Environ*, 792, 148459. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148459>
- Guinée, J. B. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards.* Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7>

- Gulotta, T. M., Salomone, R., Mondello, G., Saija, G., Lanuzza, F., & Briguglio, N. (2023). Life Cycle Assessment and Environmental Life Cycle costing of a unitised regenerative fuel cell stack. *Sci Total Environ*, 901, 166007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166007>
- Guo, H., Yang, S., Wang, X., & Liu, J. (2019). Technical Assessment of Industrial Solid Waste Recycling Process Based on the Willingness-to-Pay LCIA Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 484(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/484/1/012038>
- Hartmann, A. (2004). *Kaufentscheidungsprognose auf Basis von Befragungen - Modelle, Verfahren und Beurteilungskriterien* (1 ed.). Deutscher Universitätsverlag. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-322-81742-6>
- Herb, U., & Geith, U. (2020). Kriterien der qualitativen Bewertung wissenschaftlicher Publikationen. *Information - Wissenschaft & Praxis*, 71(2-3), 77-85. <https://doi.org/10.1515/iwp-2020-2074>
- Herrmann, C., & Vetter, O. (2021). *Studie: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Remanufacturing von Produkten*. https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VD_I-ZRE_Studie_Remanufacturing_Web_bf.pdf
- IG Windkraft. (2024a). *Windkraftleistung in Österreich - Ende 2023 und Prognose 2024*. Interessengemeinschaft Windkraft Österreich. Retrieved 01.05.2024 from https://www.igwindkraft.at/fakten/?xmlval_ID_KEY%5B0%5D=1234
- IG Windkraft. (2024b). *Windrad-Landkarte*. Interessengemeinschaft Windkraft Österreich. Retrieved 10.05.2024 from [https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY\[0\]=1055/](https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1055/)
- Inaba, A., & Itsubo, N. (2018). Preface. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(12), 2271-2275. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1545-6>
- Israelisches Ministerium für Umweltschutz. (2020). *Green Book: Estimating and Measuring External Costs of Air Pollution and Greenhouse Gas Emissions*. Retrieved from https://www.gov.il/BlobFolder/reports/green_book_external_costs_air_pollutants_greenhouse_gases/he/sustainability_economy_green_book_external_costs_air_pollution.pdf
- Johansson, J. (1999). *A Monetary Valuation Weighting Method for Life Cycle Assessment Based on Environmental Taxes and Fees* [Stockholm University]. Stockholm.
- Kabakian, V., & McManus, M. (2023). From private to social cost-benefit analysis: life cycle environmental impact cost internalization in cement production fuel switching. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03694-z>
- Kasner, R. (2022). The environmental efficiency of materials used in the lifecycle of a wind farm. *Sustainable Materials and Technologies*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00512>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kitchenham, B., Charters, S., Budgen, D., Brereton, P., Turner, M., Linkman, S., Jørgensen, M., Mendes, E., & Visaggio, G. (2007). Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering.
- Kolstad, C. D. (2000). *Environmental economics*. New York, NY [u.a.] : Oxford Univ. Press. <https://permalink.catalogplus.tuwien.at/AC02630630>

- Köpl, A., Schleicher, S., & Schratzenstaller, M. (2021). *CO2-Bepreisung in der Steuerreform 2022/2024* (WIFO Research Briefs, Issue).
- Landgraf, M., Zeiner, M., Knabl, D., & Corman, F. (2022). Environmental impacts and associated costs of railway turnouts based on Austrian data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103168>
- Läzer, K. L., Sonntag, M., Drazek, R., Jaeschke, R.-I., & Hogreve, C. (2010). *Einführung in die systematische Literaturrecherche mit den Datenbanken „PsycINFO“, „Pubmed“ und „PEP – Psychoanalytic Electronic Publishing“ sowie in das Literaturverwaltungsprogramm „Citavi“*. <https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/2010081634029#>
- Leite, G. d. N. P., Weschenfelder, F., Farias, J. G. d., & Kamal Ahmad, M. (2022). Economic and sensitivity analysis on wind farm end-of-life strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112273>
- Life Cycle Assessment Society of Japan. (2024). *LIME3 Coefficient List*. Life Cycle Assessment Society of Japan,. Retrieved 28.05.2024 from <https://lca-forum.org/english/lime/>
- Liu, P. (2017). *Reducing The Environmental Impact Of Wind Turbine Blades* [Dissertation, University of Cambridge].
- Ma, J., & Kremer, G. E. (2014). *A Fuzzy Logic-Based Approach for Handling Uncertain EOL Options in Product Design Stage* Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference Y. Guan and H. Liao, eds.,
- Mali, S., & Garrett, P. (2023). *Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore EnVentus V162-6.2 MW Wind Plant*. Vestas Wind Systems A/S.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The Limits to Growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. Universe Books.
- 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>
- Mohan, M. (2018). Chapter 14 - Perovskite Photovoltaics: Life Cycle Assessment. In S. Thomas & A. Thankappan (Eds.), *Perovskite Photovoltaics* (pp. 447-480). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812915-9.00014-9>
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2010). *Rise and Fall of the Carbon Civilisation - Resolving Global Environmental and Resource Problems*. Springer London. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-84996-483-8>
- Nagle, A. J., Delaney, E. L., Bank, L. C., & Leahy, P. G. (2020). A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123321>
- Neumann, J. (2018). *Leitfaden für die Erstellung einer Abschlussarbeit als systematische Übersichtsarbeit*. U. t. Duisburg-Essen. [https://www.uni-due.de/imperia/md/content/biwi/aopsy/systematische uebersichtsarbeit-ao.pdf](https://www.uni-due.de/imperia/md/content/biwi/aopsy/systematische_uebersichtsarbeit-ao.pdf)
- Nguyen, T. L. T., Laratte, B., Guillaume, B., & Hua, A. (2016). Quantifying environmental externalities with a view to internalizing them in the price of products, using different monetization models. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.018>

- Organisation for Economic Co-Operation and Development. (1995). *ENVIRONMENTAL PRINCIPLES AND CONCEPTS*.
[https://one.oecd.org/document/OCDE/GD\(95\)124/En/pdf](https://one.oecd.org/document/OCDE/GD(95)124/En/pdf)
- Paulsen, E. B., & Enevoldsen, P. (2021). A Multidisciplinary Review of Recycling Methods for End-of-Life Wind Turbine Blades. *Energies*, 14(14).
<https://doi.org/10.3390/en14144247>
- Porst, R. (2009). *Fragebogen: Ein Arbeitsbuch* (2 ed.). VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-531-91840-2>
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*. N. E. A. Agency.
- PRé Sustainability B.V. (2022). *SimaPro Database Manual - Methods Library*.
<https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>
- PRé Sustainability B.V. (2024). *What does the acronym ReCiPe mean?* Retrieved 05.02.2024 from <https://support.simapro.com/s/article/What-does-the-acronym-ReCiPe-mean>
- Preiss, P., & Klotz, V. (2008). *EcoSenseWeb V1.3 - User's Manual & "Description of Updated and Extended Draft Tools for the Detailed Site-dependent Assessment of External Costs"*.
- Ramírez, F. J., Villena-Ruiz, R., Honrubia-Escribano, A., Pérez-Barroso, A., & Gómez-Lázaro, E. (2022). Assessment of different end-of-life strategies for wind power plants under uncertainty. *Energy Conversion and Management*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116158>
- Rathore, N., & Panwar, N. L. (2023). Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview. *Waste Management & Research*, 41(4), 744-759. <https://doi.org/10.1177/0734242X221135527>
- Remeur, C. c. (2020). *Understanding environmental taxation*.
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/646124/EPRS_BRI\(2020\)646124_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/646124/EPRS_BRI(2020)646124_EN.pdf)
- Rentizelas, A., Trivyza, N., Oswald, S., & Siegl, S. (2021). Reverse supply network design for circular economy pathways of wind turbine blades in Europe. *International Journal of Production Research*, 60(6), 1795-1814.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1870016>
- S&P Trucost Limited. (2019). *Trucost Environmental Register - Methodology FAQs*. S. P. T. Limited.
[https://www.jpox.co.jp/corporate/sustainability/esgknowledgehub/esg-rating/nlsgeu0000053wxn-att/Trucost Environmental Register Methodology FAQs.pdf](https://www.jpox.co.jp/corporate/sustainability/esgknowledgehub/esg-rating/nlsgeu0000053wxn-att/Trucost%20Environmental%20Register%20Methodology%20FAQs.pdf)
- Scherhauer, S., Part, F., & Beigl, P. (2020). Das Sekundärressourcenpotenzial aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 73(1-2), 36-48. <https://doi.org/10.1007/s00506-020-00723-3>
- Scopus LibGuide. (2023). *Scopus Search Guide*. Elsevier. Retrieved 11.12.2023 from
<http://schema.elsevier.com/dtds/document/bkapi/search/SCOPUSSearchTips.htm>
- Simonis, U. (2003). *Öko-Lexikon* (Orig.-Ausg. ed.). München : Beck.
<https://permalink.catalogplus.tuwien.at/AC03722026>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339.
<https://doi.org/10.1016/j.ibusres.2019.07.039>

- 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>
- Steen, B. (2015). *The EPS 2015d impact assessment method – an overview* (2015:5). https://www.lifecyclecenter.se/wp-content/uploads/2015_05-The-EPS-2015d-impact-assessment-method.pdf
- Stichting Sustainability Impact Metrics. (2024a). *The concept, structure, and midpoint tables of the eco-costs for LCA*. Stichting Sustainability Impact Metrics. Retrieved 14.05.2024 from <https://www.ecocostsvalue.com/ecocosts/eco-costs-concept/>
- Stichting Sustainability Impact Metrics. (2024b). *The way eco-costs of emissions are determined*. Stichting Sustainability Impact Metrics. Retrieved 14.05.2024 from <https://www.ecocostsvalue.com/ecocosts/eco-costs-emissions/>
- Tang, L., Nagashima, T., Hasegawa, K., Ohara, T., Sudo, K., & Itsubo, N. (2015a). Development of human health damage factors for PM2.5 based on a global chemical transport model. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(12), 2300-2310. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0837-8>
- Tang, L., Nagashima, T., Hasegawa, K., Ohara, T., Sudo, K., & Itsubo, N. (2015b). Development of human health damage factors for tropospheric ozone considering transboundary transport on a global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(12), 2339-2348. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1001-9>
- 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/https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- van Buren, N., Demmers, M., van der Heijden, R., & Witlox, F. (2016). Towards a Circular Economy: The Role of Dutch Logistics Industries and Governments. *Sustainability*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/su8070647>
- Vogtländer, J. G., Brezet, H. C., & Hendriks, C. F. (2001). Allocation in recycling systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(6), 344-355. <https://doi.org/10.1007/BF02978865>
- Vogtländer, J. G., & Mestre, A. C. (2009). *The Eco-costs/Value Ratio for quantitative, LCA based, assessment of sustainability* International Conference on Sustainability Measurement and Modelling Barcelona.
- Wagemann, C., Goerres, A., & Siewer, M. B. (2020). *Handbuch Methoden der Politikwissenschaft* (1 ed.). Springer VS Wiesbaden. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-658-16936-7>
- Webster, J., & Watson, R. T. (2002). Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. *MIS Quarterly*, 26(2), xiii-xxiii. <http://www.jstor.org/stable/4132319>
- Weidema, B. P. (2009). Using the budget constraint to monetarise impact assessment results. *Ecological Economics*, 68(6), 1591-1598. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.01.019>
- Weidema, B. P., Wesnæs, M., Hermansen, J., Kristensen, T., & Halberg, N. (2018). *Environmental Improvement Potentials of Meat and Dairy Products* (P. Eder & L. Delgado, Eds.). Office for Official Publications of the European Communities. <https://doi.org/10.2791/38863>
- Wien Energie GmbH. (2023). *CO2-Preis in Österreich*. Wien Energie GmbH. Retrieved 23.11.2023 from

<https://positionen.wienenergie.at/wissenshub/energie-dashboard/co2-preis-in-oesterreich/#:~:text=32%2C50%20€,in%20%20%20%20im%20nationalen%20Emissionshandel>.

- Yi, S., Kurisu, K. H., & Hanaki, K. (2011). Life cycle impact assessment and interpretation of municipal solid waste management scenarios based on the midpoint and endpoint approaches. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(7), 652-668. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0297-3>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139184>
- Zhong, Z. W., Song, B., & Loh, P. E. (2011). LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine. *Renewable Energy*, 36(8), 2227-2237. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.021>

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modell der Linearwirtschaft angelehnt an Herrmann und Vetter (2021, S. 16).....	6
Abbildung 2: Modell der Kreislaufwirtschaft angelehnt an die Europäische Kommission (2014, S. 6); Herrmann und Vetter (2021, S. 17).....	7
Abbildung 3: 9R-Rahmenkonzept angelehnt an Herrmann und Vetter (2021, S. 18); Kirchherr et al. (2017, S. 224).....	9
Abbildung 4: schematischer Aufbau einer Windkraftanlage.....	17
Abbildung 5: Massenanteile der Komponenten einer WKA (angelehnt an Scherhauser et al. (2020, S. 42))	17
Abbildung 6: Materialaufteilung einer WKA (angelehnt an Scherhauser et al. (2020, S. 42)).....	18
Abbildung 7: Windkraftleistung in Österreich - Ende 2023 und Prognose 2024 (IG Windkraft, 2024a).....	19
Abbildung 8: Verteilung der Gesamtpunktzahl der bewerteten Literatur der FF1	34
Abbildung 9: Verteilung der Gesamtpunktzahl der bewerteten Literatur der FF2, FF3 und Backward-and-Forward Methode.....	35
Abbildung 10: Jährliche und kumulative Darstellung der Veröffentlichungsjahre der bewerteten Literatur	36
Abbildung 11: Anzahl der Veröffentlichungen und Zitierungen der bewerteten Literatur nach Land	36
Abbildung 12: Gesamtrahmen, schematisch - Environmental Prices (angelehnt an De Bruyn et al. (2018b, S. 23)).....	50
Abbildung 13: Beziehungen Schadstoff, midpoint & endpoint Ebene - Environmental Prices (angelehnt an De Bruyn et al. (2018b, S. 4))	51
Abbildung 14: Impact Pathway Approach (IPA) - schematischer Ablauf (angelehnt an Bickel und Friedrich (2005, S. 2)).....	52
Abbildung 15: Modellaufbau - Ecocost aus EVR Methode (angelehnt an Stichting Sustainability Impact Metrics (2024a)).....	53
Abbildung 16: Vermeidungskurve (schematisch, angelehnt an Vogtländer et al. (2001, S. 355))	54
Abbildung 17: Grundlegende Struktur - LIME3 (angelehnt an Inaba und Itsubo (2018, S. 2273))	55
Abbildung 18: Verbindungen von Midpoints zu Endpoints - Stepwise2006 (zusammengetragen aus Weidema et al. (2018, S. 159-164)	57
Abbildung 19: Beispielhafte Sachbilanz von Rotorblättern in EoL Phase	77
Abbildung 20: Übersicht Vorgehensweise EVR Bepreisungsmethode	79
Abbildung 21: Interviewleitfaden - Experteninterviews - Seite 1	111
Abbildung 22: Interviewleitfaden - Experteninterviews - Seite 2	112

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Produktion einer WKA über gesamte Lebensdauer.....	80
Formel 2: Werte der Wirkungskategorien über gesamte Lebensdauer einer WKA ...	80
Formel 3: normalisierte Wirkungskategorien / monetary endpoints	81
Formel 4: Ecocosts	81

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rechercheprotokoll – erstes Blatt	28
Tabelle 2: Ausschlusskriterien für die Auswahl der Literatur der SLR	29
Tabelle 3: Zusammenfassung der Daten der Durchführung der SLR.....	32
Tabelle 4: Gesamtanzahl der effektiv relevanten Literaturen beider Methoden.....	32
Tabelle 5: Gegenüberstellung der relevanten Literaturquellen und derer Bepreisungsmethoden (ohne WKA Bezug)	46
Tabelle 6: Bewertungsmethode der Schäden - Ecovalue08 (angelehnt an Ahlroth und Finnveden (2011, S. 1995))	49
Tabelle 7: Vergleich Bepreisungsmethoden – Kategorie Geografischer Gültigkeitsbereich.....	60
Tabelle 8: Vergleich Bepreisungsmethoden – Kategorie Wirkungskategorien	61
Tabelle 9: Vergleich Bepreisungsmethoden – Kategorie Ermittlung monetärer Gewichtungsfaktoren	62
Tabelle 10: Vergleich Bepreisungsmethoden - Literaturquellen	63
Tabelle 11: Vergleich Wirkungskategorien (mit WKA Bezug)	64
Tabelle 12: Vergleich Wirkungskategorien - Kurzbeschreibung WKA Bezug	64
Tabelle 13: Bezug zwischen midpoint Wirkungskategorien und EoL Optionen verschiedener Literaturquellen (mit WKA Bezug)	66
Tabelle 14: Vergleich Bepreisungsmethoden – Kategorie Wirkungskategorien (komprimiert).....	72
Tabelle 15: Vor- und Nachteile Bepreisungsmethoden nach Vergleichskriterien	73
Tabelle 16: Werte der Wirkungskategorien des LCA von Mali und Garrett (2023, S. 48) – EoL Phase.....	80
Tabelle 17: Werte der Wirkungskategorien über gesamte Lebensdauer einer WKA.	80
Tabelle 18: Grenzvermeidungskosten EVR-Methode - Referenzjahr 2022	81
Tabelle 19: normalisierte Wirkungskategorien / monetary endpoints	81
Tabelle 20: Experteninterviews – Übersicht Durchführung	84
Tabelle 21: Massenanteile Komponenten einer WKA in kg/MW nach Scherhauser et al. (2020, S. 42).....	107
Tabelle 22: Materialanteile einer WKA in kg/MW nach Scherhauser et al. (2020, S. 42)	107
Tabelle 23: Kategorisierung der als relevant erachteten Literaturen	110
Tabelle 24: Anzahl der Veröffentlichungen und Zitierungen der bewerteten Literaturen nach Land	110

12 Abkürzungsverzeichnis

BaF Methode	Backward-and-Forward Methode
BAHY	Biodiversity Adjusted Hectare Year
CED	Cumulative Energy Demand
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CV	kontingenten Bewertung (engl. contingent valuation (CV))
DEA	Data Envelopment Analysis
engl.	Englisch
EoL	End-of-Life
EP	Environmental Prices
EPS	Environmental Priorities Strategies in Product Design
EVR	Eco-Costs-Value Ratio
FFx	Subforschungsfragen
Formel - E	Ecocosts
Formel - G _{mon}	monetärer Gewichtungsfaktor
Formel - L	Lebensdauer
Formel - P	Produktion einer WKA
Formel - P _{ges}	Produktion über die gesamte Lebensdauer einer WKA
Formel - W _{ein}	Werte der Wirkungskategorien pro kWh
Formel - W _{ges}	Werte der Wirkungskategorien über die gesamte Lebensdauer einer WKA
Formel - W _{norm}	normalisierte Wirkungskategorie
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GS	Google Scholar
GWP	Erderwärmungspotential (engl. Global Warming Potential)
HVF	Hochspannungszerkleinerung (engl. High Voltage Fragmentation)
IPA	Impact Pathway Approach
kg	Kilogramm
LCA	Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment)
LCI	Sachbilanzen (engl. Life Cycle Inventory)
LCIA	Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment)
LFn	Leitfragen
LIME	Life-Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modelling
MILP	Mixed-Integer-Linear-Program
MJ	Megajoule
MMG	Milieugelateerde Materialprestatie Gebouwelementen

MS-Excel	Microsoft-Excel
MW	Megawatt
NOAEL	No Observed Adverse Effect Level
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
PET	Polyethylenterephthalat
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
QALY	Quality Adjusted Life Year
SC	Scopus
SD	ScienceDirect
SEK	schwedischen Kronen
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SLR	Systematische Literaturrecherche
SSIM	Stiftung Stichting Sustainable Impact Metrics
TRACI	Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts
UK	Vereinigtes Königreich
WKA	Windkraftanlage
WtA	entstandenen Kosten durch den bereits erfolgten Schaden (engl. Willingness to Accept)
WtP	Kosten für die Vermeidung des Schadens (engl. Willingness to Pay)

13 Anhang

Komponente	kg/MW
Fundament	430.770,00
Turbine	126.202,34
Verkabelung	5.900,42
Elektronisches System	750,92
Transformer	580,00

Tabelle 21: Massenanteile Komponenten einer WKA in kg/MW nach Scherhauser et al. (2020, S. 42)

Material	kg/MW
Beton	404.570,00
Eisenmetalle	137.596,27
Polymere	8.902,56
GFK/CFK	7.520,00
Buntmetalle	4.526,58
Andere	1.088,26

Tabelle 22: Materialanteile einer WKA in kg/MW nach Scherhauser et al. (2020, S. 42)

In dieser Arbeit berücksichtigte Literatur der SLR & BaF				
Titel	Autor(en)	Jahr	Literaturbewertung nach FFx	
			FF1	FF2 & FF3
Environmental impact assessment of recycled HMA with RAP materials from the rotary decomposition process compared to virgin HMA and conventional recycled HMA	Ai, Xinman; Pei, Zhongshi; Cao, Jiwei	2023	22	
Wind turbines' end-of-life: Quantification and characterisation of future waste materials on a national level	Andersen, Niklas; Eriksson, Ola; Hillman, Karl; Wallhagen, Marita	2016	19	
The Re-use of End-of-Life Fiber Reinforced Polymer Composites in Construction	André, Alann; Magdalena, Juntikka; Cecilia, Mattsson	2022	21	
Comparison of different monetization methods in LCA: A review	Arendt, Rosalie; Bachmann, Till M.; Motoshita, Masaharu	2020	24	
Comparative study between different valorization methods of glass fiber waste from end-of-life wind turbine blades	Chikha, Imen; Bouzidi, Youcef; Tazi, Nacef	2022	22	
Sustainable reverse logistic network design for end-of-life use-case study	Cinar, Suna	2021	20	21
Reverse logistic network design for end-of-life wind turbines	Cinar, Suna; Yildirim, Mehmet Bayram	2017	22	21
Life cycle assessment of carbon reduction potential of EoL wind turbine blades disposal scenarios in China	Cong, Nan; Song, Yan; Zhang, Ming	2023	19	22
Sustainability Implications of Current Approaches to End-of-Life of Wind Turbine Blades—A Review	Delaney, Emma L.; Leahy, Paul G.; McKinley, Jennifer M.	2023	21	
Mind the Pulp: Environmental and economic assessment of a sugar beet pulp biorefinery for biobased chemical production	García-Velásquez, Carlos; van der Meer, Yvonne	2023	20	
Integrated LCA and DEA approach for circular economy-driven performance evaluation of wind turbine end-of-life treatment options	Gennitsaris, Stavros; Sagani, Angeliki; Sofianopoulou, Stella	2023	25	27

Monetizing environmental impact of integrated aquaponic farming compared to separate systems	Greenfeld, Asael; Becker, Nir; Bornman, Janet F.; Spatari, Sabrina; Angel, Dror L.	2021	22	
Life Cycle Assessment and Environmental Life Cycle costing of a unitised regenerative fuel cell stack	Gulotta, Teresa Maria; Salomone, Roberta; Mondello, Giovanni; Saija, Giuseppe; Lanuzza, Francesco; Briguglio, Nicola	2023	22	
From private to social cost-benefit analysis: life cycle environmental impact cost internalization in cement production fuel switching	Kabakian, Vahakn; McManus, Marcelle	2023	25	
The environmental efficiency of materials used in the lifecycle of a wind farm	Kasner, Robert	2022	25	25
Environmental impacts and associated costs of railway turnouts based on Austrian data	Landgraf M.; Zeiner M.; Knabl D.	2022	22	
Economic and sensitivity analysis on wind farm end-of-life strategies	Leite, Gustavo de Novaes Pires; Franciele Weschenfelder; João Gabriel de Farias	2022	21	
Evaluation of the environmental impacts related to the wind farms end-of-life	Mello, Gisela; Ferreira Dias, Marta; Robaina, Margarita	2022	19	
A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades	Nagle, Angela J.; Delaney, Emma L.; Bank, Lawrence C.	2020	21	23
Quantifying environmental externalities with a view to internalizing them in the price of products, using different monetization models	Nguyen, Thu Lan Thi; Laratte, Bertrand; Guillaume, Bertrand; Hua, Anthony	2016	22	
A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades	Paulsen, Ebbe Bagge; Enevoldsen, Peter	2021	20	
Assessment of different end-of-life strategies for wind power plants under uncertainty	Ramirez, F. Javier; Villena-Ruiz R.; Honrubia-Escribano A.	2022	20	
Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview	Rathore, Neelam; Panwar N.L.	2023	23	
Reverse supply network design for circular economy pathways of wind turbine blades in Europe	Rentzelas, Athanasios; Trivyza, Nikoletta; Oswald, Sarah; Siegl, Stefan	2021	23	24
Steering Sustainable End-of-Life Treatment of Glass and Carbon Fiber Reinforced Plastics Waste from Rotor Blades of Wind Power Plants	Sommer, Valentin; Becker, Tristan; Walther, Grit	2022	21	22
Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling	Zhang, Weiwei; Yu, Hao; Yin, Binbin; Akbar, Arslan; Liew K.M.	2023	24	
LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine	Zhong, Z.W.; Song, B.; Loh, P.E.	2011	22	
Nicht in dieser Arbeit berücksichtigte Literatur der SLR & BaF				
Titel	Autor(en)	Jahr	Literaturbewertung nach FFx	
			FF1	FF2 & FF3
A review of monetary valuation in life cycle assessment: State of the art and future needs	Amadei, Andrea Martino; De Laurentiis, Valeria; Sala, Serenella	2021	23	
Modeling waste generation and end-of-life management of wind power development in Guangdong, China until 2050	Chen, Yushu; Cai, Guotian; Zheng, Lixing	2021	19	
An integrated geospatial approach for repurposing wind turbine blades	Delaney, Emma L.; McKinley, Jennifer M.; Megarry, William	2021	15	
Maintenance and remanufacturing strategy: using sensors to predict the status of wind turbines	Dulman, Mehmet Talha; Gupta, Surendra M.	2018	14	
Sustainable end-of-life value chain scenarios for wind turbine blades	Fayyaz S.; Lund K.W.; Khoshnevisan B.; Madsen E.S.; Birkved M.	2023	16	15
A holistic tool to assess the cost and environmental performance of floating offshore wind farms	Ferreira, Victor J.; Benveniste, Gabriela; Rapha, José I.	2023	20	
Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials	Fonte, Rosario; Xydis, George	2021	18	
The Circular Economy Life Cycle Assessment and Visualization Framework: A Multistate Case Study of Wind Blade Circularity in United States	Ghosh, Tapajyoti; Hanes, Rebecca; Key, Alicia	2022	17	17

Recycling of carbon fiber reinforced composite waste to close their life cycle in a cradle-to-cradle approach	Giorgini, Loris; Benelli, Tiziana; Brancolini, Gianluca; Mazzocchetti, Laura	2020	19	
Technical Assessment of Industrial Solid Waste Recycling Process Based on the Willingness-to-Pay LCIA Model	Guo, Huiting; Yang, Shuo; Wang, Xiuteng	2019	23	
A multi-attribute review toward effective planning of end-of-life strategies for offshore wind farms	Jadali, Ali; Ioannou, Anastasia; Kolios, Athanasios	2021	20	
Recycling of wind turbine blades through modern recycling technologies: A road to zero waste	Khalid, Muhammad Yasir; Arif, Zia Ullah; Hossain, Mokarram	2023	19	
Life cycle assessment and life cycle cost analysis of a 40 MW wind farm with consideration of the infrastructure	Li, Qiangfeng; Duan, Huabo; Xie, Minghui	2021	20	
REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF WIND TURBINE BLADES	Liu, Pu	2017	28	
Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison	Liu, Pu; Meng, Fanran; Barlow, Claire Y.	2022	20	20
Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison	Liu, Pu; Meng, Fanran; Barlow, Claire Y.	2019	22	22
Failure mode identification and end of life scenarios of offshore wind turbines: A review	Luengo, Maria Martinez; Kolios, Athanasios	2015	16	
Repurposing and recycling wind turbine blades in the United States	Martini, Ryan; Xydis, George	2023	20	
Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL	Mattsson C.; André A.; Juntikka M.	2020	16	
How ready is the wind energy industry for the circular economy?	Mendoza, Joan Manuel F.; Pigosso, Daniela C.A.	2023	18	
Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions	Mishnaevsky, Leon	2021	17	
Carbon footprint and embodied energy of a wind turbine blade—a case study	Morini, Antonio Augusto; Ribeiro, Manuel J.; Hotza, Dachamir	2021	21	
An experimental investigation and process optimization of the oxidative liquefaction process as the recycling method of the end-of-life wind turbine blades	Mumtaz, Hamza; Sobek, Szymon; Sajdak, Marcin	2023	23	
GHG emissions and energy performance of offshore wind power	Raadal, Hanne Lerche; Vold, Bjørn Ivar; Myhr, Anders; Nygaard, Tor Anders	2014	20	
Additive re-manufacturing of mechanically recycled end-of-life glass fiber-reinforced polymers for value-added circular design	Romani, Alessia; Mantelli, Andrea; Suriano, Raffaella	2020	19	
Estimation of glass and carbon fiber reinforced plastic waste from end-of-life rotor blades of wind power plants within the European Union	Sommer, Valentin; Stockschröder, Jan; Walther, Grit	2020	19	
Waste and material flow analysis in the end-of-life wind energy system	Tazi, Nacef; Kim, Junbeum; Bouzidi, Youcef	2019	20	19
Recycling offshore wind farms at decommissioning stage	Topham, Eva; McMillan, David; Bradley, Stuart	2019	15	
Regional representation of wind stakeholders' end-of-life behaviors and their impact on wind blade circularity	Walzberg, Julien; Cooperman, Aubryn; Watts, Liam	2022	18	
The inclusion of uncertainty in circularity transition modeling: A case study on wind turbine blade end-of-life management	Walzberg, Julien; Hanes, Rebecca; Ghosh, Tapajyoti	2023	22	
Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine	Weinzettel, Jan; Reenaas, Marte; Solli, Christian	2009	15	
Upcycling of decommissioned wind turbine blades through pyrolysis	Yang, Wooyoung; Kim, Ki-Hyun; Lee, Jechan	2022	19	
Life cycle impact assessment and interpretation of municipal solid waste management scenarios based on the midpoint and endpoint approaches	Yi, Sora; Kurisu, Kiyo H.	2011	18	

Zu geringer Informationsgehalt der Literatur der SLR & BaF in Bezug auf FFx

Titel	Autor(en)	Jahr	Literaturbewertung nach FFx
Corrective taxes for pollution control. An application of the environmental pricing and standards systems to agriculture	Abrams L.W.; Barr J.L.	1974	0
A review of end-of-life decision making for offshore wind turbines	Boyd, David; Karimirad, Madjid; Sivakumar, Vinayagamoothy	2022	0

Gowind: Wind energy spatiotemporal assessment and characterization of end-of-life activities	Haces-Fernandez, Francisco	2020	0
Transdisciplinary End-of-Life Analysis of Wind Turbines	Harder, Philipp; Dreßler, Daniel; Böning, Christian; Stonis, Malte	2022	0
Testing Resilience Aspects of Operation Options for Offshore Wind Farms beyond the End-of-Life	Köpke, Corinna; Mielniczek, Jennifer; Stolz, Alexander	2023	0
Environmental pricing: Studies in policy choices and interactions	Kreiser, Larry; Andersen, Mikael Skou; Olsen, Birgitte Egelund	2015	0
Sustainability assessment of new technologies using multi criteria decision making: A framework and application in sectioning end-of-life wind turbine blades	Lund, Kristine Wilhelm; Nielsen, Mikkel Liep; Madsen, Erik Skov	2023	0
Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections towards sustainability initiatives	Msigwa, Goodluck; Ighalo, Joshua O.; Yap, Pow-Seng	2022	0
A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy	Naqvi S.R.; Prabhakara, H. Mysore; Bramer E.A.	2018	0
A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades	Rani, Manjeet; Choudhary, Priyanka; Krishnan, Venkata	2021	0
Current and potential decommissioning scenarios for end-of-life composite wind blades	Sakellariou, Nicholas	2018	0
Integration of sustainability, stakeholder and process approaches for sustainable offshore wind farm decommissioning	Spielmann, Vanessa; Brey, Thomas; Dannheim, Jennifer	2021	0

Tabelle 23: Kategorisierung der als relevant erachteten Literaturen

Land	Anzahl Literaturen	Anzahl Zitierungen
USA	14	71
UK	12	329
China	8	92
Deutschland	7	95
Dänemark	6	107
Griechenland	4	58
Italien	4	93
Frankreich	3	86
Spanien	3	6
Schweden	3	61
Polen	3	7
Indien	2	115
Brasilien	2	20
Irland	2	98
Niederlande	2	245
Südkorea	2	73
Portugal	1	9
UAE	1	18
Singapur	1	61
Tschechien	1	178
Norwegen	1	101
Österreich	1	7
Israel	1	19

Tabelle 24: Anzahl der Veröffentlichungen und Zitierungen der bewerteten Literaturen nach Land

INTERVIEWLEITFADEN
**Bepreisungsmodelle für ökologische Umweltauswirkungen von EoL Optionen
an Windkraftanlagen**

Vorbemerkung: Im Rahmen der Diplomarbeit „Entwicklung eines Modells zur Bepreisung der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen“ wird das übergeordnete Ziel verfolgt, ein existierendes Bepreisungsmodell zu identifizieren, welches für die Betrachtung der ökologischen Umweltauswirkungen von End-of-Life Optionen an Windkraftanlagen am besten geeignet ist. Das nachfolgend durchgeführte Interview soll die Vorgehensweise und Ergebnisse dieser Diplomarbeit evaluieren.

Erhebungsrahmendaten

Interviewer	Felix Gauss, TU Wien, e11713096@student.tuwien.ac.at
Interview mit	
Datum des Gesprächs	
Interviewort	
Interviewdauer	
Interviewmethode	ExpertInnen Interview

Aufbau des Interviews

- I Vorstellung und kurze Präsentation der Vorgehensweise & Ergebnisse
- II Interviewdurchführung anhand der Leitfragen
- III Dank und Verabschiedung

Leitfragen

I	Sind Sie der Meinung, dass die Unterteilung einer Windkraftanlage in Komponenten und deren Materialien gegenüber der Windkraftanlage als gesamtes System für die Betrachtung der End-of-Life Optionen von Vorteil ist?
II	Sind Sie der Meinung, dass die Identifikation der Bepreisungsmodelle anhand der durchgeführten systematischen Literaturrecherche ausreichend ist? Gibt es gegebenenfalls Bepreisungsmodelle die Ihrer Meinung nach vernachlässigt wurden?
III	Sind Sie der Meinung, dass die verwendeten Vergleichskriterien zur Auswahl des geeignetsten Bepreisungsmodells ausreichend und umfassend gewählt sind?
IV	Sind Sie der Meinung, dass die relevant erachteten Midpoint-Wirkungskategorien die ökologischen Umweltauswirkungen der End-of-Life Optionen einer Windkraftanlage umfassend abdecken?
V	Ist Ihrer Meinung nach die Vorgehensweise und Auswahl eines bestehenden Bepreisungsmodells für den Use Case einer Windkraftanlage in dieser Arbeit ausreichend repräsentativ? Worin sehen Sie Stärken und/oder Schwächen?