

Vorgehensweise und Auswahl der Nachhaltigkeitsindikatoren im Rahmen des InNOSys-Projekts

Jens Buchgeister¹ und Heidi Hottenroth²

¹ Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlstraße 11, 76133 Karlsruhe

² Hochschule Pforzheim, Institut für Industrial Ecology (INEC), Tiefenbronnerstraße 65, 75175 Pforzheim

August 2021

Inhaltsverzeichnis

1.	Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswahl an Literaturquellen.....	3
2.	Ergebnisse der Literaturanalyse	3
2.1	Internationale und nationale Literatur zur nachhaltigen Entwicklung.....	3
2.2	Internationale und nationale Literatur zu Nachhaltigkeitsindikatoren für die Energieversorgung, Technologien und Sektoren.....	4
2.3	Literatur zu verwendeten Umweltindikatoren im Rahmen der Umweltwirkungs- abschätzung in der Ökobilanzierung	5
2.4	Weiteres Vorgehen zur Strukturierung der Vielzahl an Indikatoren.....	9
3.	Festlegung von Kriterien zur Auswahl der Nachhaltigkeitsindikatoren	11
4.	Literatur.....	14
5.	Anhang.....	19

1. Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswahl an Literaturquellen

Für die Auswahl der relevanten und aussagekräftigen Nachhaltigkeitsindikatoren wurde eine intensive Literaturrecherche durchgeführt. Die Analyse wurde entsprechend folgendem Vorgehen systematisiert. Zunächst wurde Literatur konsultiert, die die internationale und nationale Diskussion über Nachhaltigkeit bzw. einer nachhaltigen Entwicklung im politischen und wissenschaftlichen Kontext widerspiegelt, um Leitlinien und Rahmenbedingungen für eine Nachhaltigkeitsbewertung zu entwickeln. Dann wurde die Suche auf Literatur konzentriert, die sich mit Energietechnologien oder einem Sektor des Energiesystems befasst.

In einem weiteren Schritt wurde Literatur zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen ausgewertet, da die Debatte um den Umweltschutz in einer Industriegesellschaft der Vorläufer des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung war. In dieser frühen Debatte ging es darum, die anthropogen bedingten Stoff- und Energieströme in der Industriegesellschaft in der Weise zu reduzieren, dass sowohl die begrenzte Tragfähigkeit der Umweltkompartimente Luft, Wasser und Boden nicht überschritten als auch die Nutzung der Ressourcen (Rohstoffe, Wasser, Boden) nicht erschöpft werden. In diesem Zusammenhang wurden eine Reihe von Instrumenten zur quantitativen Umweltbewertung von Produkten und Dienstleistungen entwickelt, die sowohl einen systemanalytischen Ansatz verfolgen als auch Indikatoren zur Bewertung über Umweltmodellierungen auswerten, die in das Konzept der nachhaltigen Entwicklung eingebettet wurden und einen großen Anteil der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren darstellen. Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse dargelegt.

2. Ergebnisse der Literaturanalyse

Im Folgenden sind die relevanten Quellen der internationalen und nationalen Diskussion über eine nachhaltige Entwicklung dargelegt. Anschließend werden die spezifischen Quellen ausgewertet, die sich konkret mit Energietechnologien oder einem der Sektoren des Energiesystems auseinandersetzen und zuletzt werden die Umweltindikatoren analysiert, die im Rahmen der Bewertung von Umweltauswirkungen im Rahmen der Ökobilanzierung herangezogen werden.

2.1 Internationale und nationale Literatur zur nachhaltigen Entwicklung

In der internationalen Debatte über nachhaltige Entwicklung hat die UN im Rahmen des Arbeitsprogramms zur Entwicklung von Nachhaltigkeitsindikatoren einschlägige Dokumente veröffentlicht, die den Ländern als Leitlinien dienen. Hierbei wurden die ersten beiden Sätze von Indikatoren von der UN-Kommission für nachhaltige Entwicklung in den Jahren 1996 und 2001 veröffentlicht [1]. Die UN-Kommission hat diese Arbeit über einen Zeitraum von 20 Jahren kontinuierlich fortgesetzt, bis sie die 17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) veröffentlicht hat, die einen Fahrplan zur Sicherstellung eines weltweiten Fortschritts in Bezug auf die Ausgewogenheit sozialer, ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte der nachhaltigen Entwicklung der Menschheit auf der Erde darstellen [2]. Auf diesem Weg zu den verschiedenen

17 SDGs, die fast 220 Indikatoren umfassen, haben andere Organisationen wie die OECD wichtige Zwischenergebnisse zu spezifischen Themen wie grünes Wachstum oder die grüne Wirtschaft in Industriegesellschaften vorgelegt, die in der Festlegung von Indikatoren mit aufgenommen wurde [3].

Die 17 SDGs wurden sowohl von Industrie- als auch Entwicklungsländern vereinbart, aber für jedes Land haben sie eine andere Bedeutung, um die SDGs in die jeweilige nationale Politik und Nachhaltigkeitsstrategie zu integrieren. In Deutschland wurde die Arbeit der UN sowohl von der Wissenschaft als auch von der Regierung aufgegriffen, um wesentliche Beiträge zur Gewinnung von Nachhaltigkeitsindikatoren zu leisten. Die Nationale Strategie für nachhaltige Entwicklung der Bundesregierung basiert weitgehend auf dieser Arbeit [4, 5]. Im wissenschaftlichen Kontext wurde das theoretisch fundierte Integrierte Konzept der nachhaltigen Entwicklung als methodischer Rahmen für die Ableitung von Nachhaltigkeitsindikatoren genutzt [6], insbesondere in Projekten zur Begleitung und Steuerung der Energiewende in Deutschland [7-9]. Die Ergebnisse dieser Projekte lieferten nicht nur eine Vielzahl von Indikatoren, sondern auch neue Ansätze, die im Falle einer höheren Resilienz von Systemen wertvolle Anregungen insbesondere für die Ausgestaltung der Energieversorgung geben wie eine verbesserte Resilienz mittels quantitativer Indikatoren für das gesamte Energiesystem, aber auch für Teilsysteme wie die Stromversorgung abgebildet werden kann [10-12].

2.2 Internationale und nationale Literatur zu Nachhaltigkeitsindikatoren für die Energieversorgung, Technologien und Sektoren

Da die Sicherung der Energieversorgung in modernen Industriegesellschaften mit zunehmender Globalisierung von großer Bedeutung ist, hat die Zusammensetzung des Mixes an Energieträgern unter Berücksichtigung sowohl der Importabhängigkeit eines Landes als auch der einzusetzenden Technologien z. B. zur Stromerzeugung und deren potenzieller Unfallrisiken und Umweltfolgen eine wissenschaftliche und gesellschaftliche Diskussion ausgelöst, die zu einer Reihe von wichtigen internationalen und nationalen Veröffentlichungen sowie energie- und technologiebezogene Nachhaltigkeitsindikatoren geführt hat. Zunächst werden die angewandten Literaturquellen aufgeführt, die sich mit der gesamten Energieversorgung oder mit Teilsystemen beschäftigen [13-16]. Anschließend wird die Literatur zitiert, die sich mit dem Thema Nachhaltigkeitsbewertung von spezifischen Stromerzeugungstechnologien befasst. Hier lag der Fokus insbesondere auf die Nutzung der Kernenergie [17-19].

Von besonderer Bedeutung ist der Beitrag von [15], der die Ergebnisse einer internationalen Partnerschaftsinitiative zu Indikatoren für eine nachhaltige Energieentwicklung zusammenfasst, die darauf abzielt, ein Analyseinstrument zur Bewertung von Energieerzeugungs- und -verbrauchsmustern auf nationaler Ebene bereitzustellen. Der Satz der vorgestellten Indikatoren war ein Konsens, der von fünf internationalen Organisationen zu diesem Thema erzielt wurde - zwei aus dem System der Vereinten Nationen (die Abteilung für wirtschaftliche und soziale Angelegenheiten sowie die Internationale Atomenergieagentur), zwei von der Europäischen Union (Eurostat und die Europäische Umweltagentur) und eine von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und

Entwicklung (die Internationale Energieagentur). Auf der Grundlage allgemeiner Leitlinien können die vorgeschlagenen nationalen Energieindikatoren zur Überwachung der Auswirkungen der nationalen Energiepolitik auf die sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung eingesetzt werden.

Speziell für die Umweltbewertung der Auswirkungen auf die Energieversorgung wurden in den Dokumenten Wirkungsindikatoren für verschiedene Umweltaspekte verwendet, wie z. B. den Klimawandel oder die terrestrische und aquatische Versauerung. Diese Indikatoren wurden im Rahmen des systemanalytischen Ansatzes der Ökobilanz entwickelt und spiegeln den aktuellen Wissensstand zur Bewertung von Umweltaspekten wider, deren grundlegenden Ansätze im Kapitel 2.3 ausführlich dargestellt werden.

2.3 Literatur zu verwendeten Umweltindikatoren im Rahmen der Umweltwirkungsabschätzung in der Ökobilanzierung

Die Erhaltung der natürlichen Umwelt und ihres produktiven Kapitals, um ihre Existenz für künftige Generationen zu sichern, ist eine wichtige Voraussetzung für das Konzept der nachhaltigen Entwicklung.

Die Methode der Ökobilanzierung hat sich in der Wissenschaft zur quantitativen Bewertung von Systemfolgen im Energiebereich oder im Rahmen des Konzepts der umweltgerechten Gestaltung von Prozessen und Verfahren (Technologie) etabliert. Grund dafür ist der verwendete systemanalytische Ansatz der Methodik, der den gesamten Lebensweg des Untersuchungsgegenstandes von der Rohstoffentnahme über die Werkstoffproduktion und seine Herstellung, die Nutzung und die Entsorgung inklusive Recycling des Untersuchungsgegenstandes berücksichtigt. Zudem besitzt die Methodik den Anspruch eine in allen Aspekten der Umwelteinflussnahme vollständige quantitative Abschätzung von Umweltauswirkungen, einschließlich der Wirkungen auf den Menschen, vorzunehmen [20, 21].

In diesem Zusammenhang werden unter dem Begriff der Umwelt folgende vier Umweltschutzgüter verstanden [22, 23]:

- abiotische und biotische natürliche Ressourcen (Rohstoffe, Wasser, Bodenfläche, Flora und Fauna);
- abiotische und biotische natürliche Umwelt (z.B. Hochgebirge, Umweltmedien Wasser, Boden, Luft);
- menschliche Gesundheit;
- abiotische und biotische Kulturlandschaft und Kulturgut.

Die allgemeine Konzeptstruktur für die Umweltwirkungsabschätzung der Sachbilanzergebnisse anhand von Wirkungskategorien im Rahmen der Ökobilanz ist in der folgenden Abbildung 1 dargestellt.

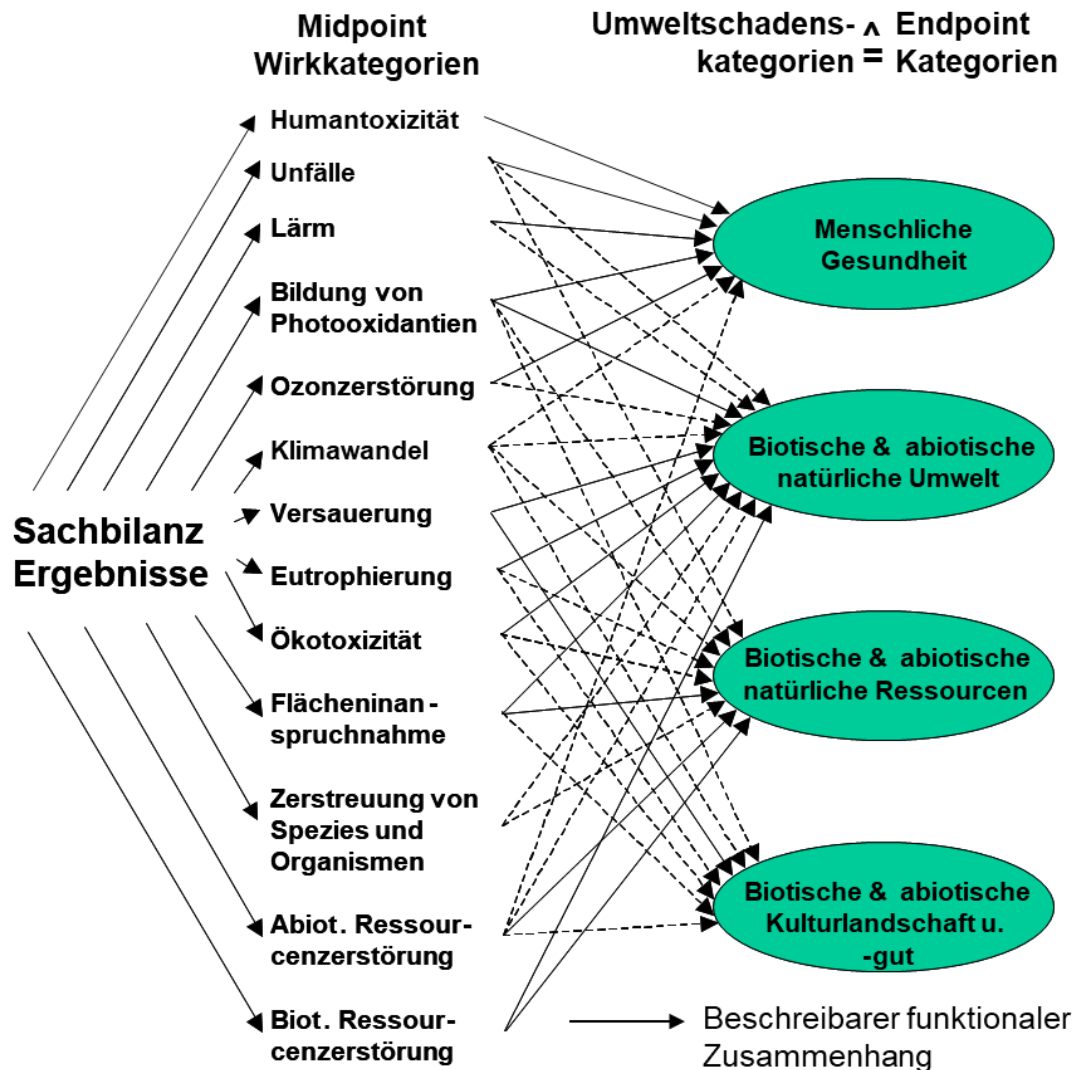


Abb. 1: Allgemeines Konzept der Wirkungskategorien zur umweltbezogenen Bewertung im Rahmen der Ökobilanzierung [angepasst nach 22]

Ziel der Konzeptstruktur ist es, sowohl die input- als auch die outputbezogenen Umwelteinflüsse (Wirkungskategorien) in einzelne Wirkungspfade, wie z.B. den Klimawandel oder die Ressourcenzerstörung, abzugrenzen und eine funktionale Beziehung zur Beschreibung der Veränderung auf der Basis der oben definierten Umweltschutzgüter zu ermöglichen. Dieses flexible Konzept bietet den Vorteil, dass neue oder bisher nur qualitativ bewertbare Umwelteinflüsse leicht in die Struktur integriert werden können. Darüber hinaus trägt es dem zunehmenden Wissen über die realen Auswirkungen auf die Umweltschutzgüter und die kausalen Zusammenhänge Rechnung.

Bei der Bestimmung, wo entlang des Umweltwirkungspfad es die funktionale Beziehung für die mathematische Beschreibung des Wirkungsindikators beginnt, gibt es zwei unterschiedliche Ansätze, die in der angelsächsischen Literatur als Midpoint- und Endpoint-Ansatz bezeichnet werden [22, 24].

Beim Vergleich des Midpoint- und Endpoint-Ansatzes zur Quantifizierung der Wirkungsbeziehung ist festzuhalten, dass der Endpoint-Ansatz eine längere Kausalkette in der

mathematischen Modellierung erfordert. Es müssen immer zwei Wirkmechanismen funktionell miteinander verknüpft sein. Dadurch wird zwar eine ausgeprägte Differenzierung der Schädigung der einzelnen Umweltschutzgüter sichtbar, aber die mathematische Beschreibung vom Umwelteinfluss durch einen Elementarfluss des Sachbilanzergebnisses erfordert eine längere Kausalkette, die mit jedem zusätzlichen Kettenglied zu einer höheren Unsicherheit zwischen den Emissionen in die Umweltmedien (Wasser, Luft, Boden) und den zu messenden Änderungen des Umweltzustands führt.

Diese Erkenntnis wurde auch von der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (Joint Research Center) in ihrer Empfehlung von zu verwendenden Charakterisierungsmodellen für verschiedene Wirkungskategorien aufgegriffen, die in einem mehrstufigen Prozess anhand wissenschaftlicher Kriterien mit den führenden Wissenschaftlern auf diesem Gebiet entwickelt und schließlich in einem Handbuch (International Life Cycle Data system (ILCD) Handbook) veröffentlicht wurden [25].

Vor dem Hintergrund der neuerlich geführten Diskussion um die Umweltwirkungsabschätzungs-Methode, die im Rahmen des Environmental Footprint (EF) empfohlen wird, wurde für einige Wirkungskategorien das im ILCD Handbook empfohlene Charakterisierungsmodell hinsichtlich der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse in der Modellierung von Umweltaspekten aktualisiert [26]. Die aktualisierte ILCD-Methode zur Umweltwirkungsabschätzung erhielt daraufhin den Namen ILCD-Midpoint 2.0.

Darüber hinaus wurden die Charakterisierungsfaktoren für das abiotische Ressourcenzerstörungspotenzial (Abiotic Resource Depletion Potential, ADP) von Mineralien und Metallen aktualisiert. Zur Aktualisierung der Charakterisierungsfaktoren wurden kumulative jährliche Förderraten von Mineralien und Metallen des Zeitraums von 1970 bis 2015 herangezogen, die für 76 Rohstoffe auf gleicher Datenbasis erstellt wurden [27].

Die ILCD-Methode 2.0 berücksichtigt 16 Wirkungskategorien, die einzelne Umweltaspekte abdecken. In der folgenden Tabelle 1 sind die berücksichtigten Wirkungskategorien, die aktualisierten empfohlenen Charakterisierungsmodelle mit den zugehörigen Literaturquellen sowie die physikalische Einheit der Wirkungsindikatoren aufgeführt.

Tab. 1: Aktualisierte Liste der Wirkungskategorien, Charakterisierungsmodelle und Wirkungsindikatoren gemäß der ILCD Midpoint-Methode 2.0

Wirkungskategorie	Empfohlenes Charakterisierungsmodell	Wirkungsindikator
Klimawandel	Basisklimamodell bei 100 Jahre Verweilzeit des Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC); Stand: 5. Bericht 2013 [28]	Strahlungsantrieb in W/m^2 als globales Treibhausgaspotenzial in CO_2 -Äqui. (Global Warming Potential 100)
Stratosphärische Ozonzerstörung	Gleichgewichtszustandsmodell des Ozonzerstörungspotentials der World Meteorological Organisation (WMO); Stand: WMO 1999 [29]	Reduzierung der stratosphärischen Ozonkonzentration als Ozonzerstörungspotentials in R11-Äqui. (Ozone depletion potential Steady-State)
Humantoxizität, krebs-erregende Effekte	USEtox-Modell; Stand: Rosenbaum et al. 2008 [30]	Vergleichbare toxische Einheiten für Menschen (Comparative toxic units for humans, $\text{CTU}_{\text{humans}}$)

Humantoxizität, nicht krebserregende Effekte	USEtox-Modell; Stand: Rosenbaum et al. 2008 [30]	Vergleichbare toxische Einheiten für Menschen (CTU _{humans})
Ökotoxizität, Süßwasser (freshwater)	USEtox-Modell; Stand: Rosenbaum et al. 2008 [30]	Vergleichbare toxische Einheiten für Ökosysteme (Comparative toxic units for ecosystems, CTU _{ecosystems})
Atemwegsbelastung, / Feinstaub	UNEP-SETAC Modell für Feinstaub; Stand: Fantke et al. 2016 [31]	Krankheitsfälle aufgrund von PM _{2,5} -Emissionen Krankheitsfälle
Photochemische Ozonbildung	LOTOS-EUROS Modell; Stand: Van Zelm et al. 2008, wie in der ReCiPe Midpoint-Methode implementiert [32]	Erhöhung der troposphärischen Ozonkonzentration in kg NMVOC-Äquivalente
Versauerung, terrestrisch und Süßwasser	Kumulierte Überschreitung des kritischen Belastungswerts für Versauerung (Accumulated Exceedance); Stand: Seppälä et al. 2006 [33], Posch et al. 2008 [34]	Versauerungs-Äquivalente in mol H ⁺ -Äquivalenter
Eutrophierung, terrestrisch	Kumulierte Überschreitung des kritischen Belastungswerts für terrestrische Eutrophierung (Accumulated Exceedance); Stand: Seppälä et al. 2006 [33], Posch et al. 2008 [34]	Eutrophierungs-Äquivalente in mol N-Äquivalente
Eutrophierung, Süßwasser (freshwater)	EUTREND Modell; Stand: Struijs et al. 2009, wie in ReCiPe Midpoint-Methode implementiert [35]	Anteil an Nährstoffen im Umweltkompartiment Süßwasser in kg P-Äquivalente
Eutrophierung, Salzwasser (marine water)	EUTREND Modell; Stand: Struijs et al. 2009, wie in ReCiPe Midpoint-Methode implementiert [35]	Anteil an Nährstoffen im Umweltkompartiment Meerwasser in kg N-Äquivalente
Ionisierende Strahlung, menschliche Gesundheit	Menschliches Gesundheitseffekt-Modell; Stand: Frischknecht et al. 2000 [36]	Menschliche Belastungs-Effizienz in kBq U235-Äquivalente
Landnutzung	Bodenqualitätsindex aus dem LANCA-Modell; Stand: Bos et al. 2016 [37]	Bodenqualitätsindex in Punkten (beinhaltet Biotische Produktion, Erosionswiderstand, mechanische Filtration, Grundwassererneuerung)
Abiotische Ressourcenzerstörung, Minerale und Metalle	Abiotisches Ressourcen-Knappheitsmodell; Stand: van Oers et al. 2020 [27]	Abiotische Ressourcenzerstörung in kg Antimon-Äquivalente
Abiotische Ressourcenzerstörung, fossile Energieträger	Abiotisches Ressourcen-Knappheitsmodell; Stand: van Oers et al. 2002 [38]	Abiotische Ressourcenzerstörung in MJ-Äquivalente
Süßwasser Knappheit	Available WATER REMaining (AWARE) Modell; Stand: Boulay et al. 2018 [39]	Nutzerentbehrung gewichteter Wasserverbrauch in kg entbehrter Welt-Äquivalente

Im Anhang befindet sich eine kurze Beschreibung des Umweltwirkungsmechanismus zur Charakterisierung des Umweltindikators von allen berücksichtigten Wirkungskategorien der ILCD Midpoint-Methode 2.0.

2.4 Weiteres Vorgehen zur Strukturierung der Vielzahl an Indikatoren

Als Ergebnis aus der in 2.1 bis 2.3 beschriebenen Literaturanalyse standen eine Liste von mehr als 300 zusammengetragenen Nachhaltigkeitsindikatoren. Um Doppelungen und auch die Unterschiede zwischen den Indikatoren sichtbar zu machen, fand eine Zuordnung der Nachhaltigkeitsindikatoren in nachfolgenden Gruppen statt:

- Energetisch
- Ökologisch
- Energiesystem bezogen
- Sozial
- Ökonomisch

Durch diese Eingruppierung ließ sich bereits eine deutliche Reduzierung der ökologischen und energetischen Indikatoren erzielen, da die unter 2.3 dargelegten Indikatoren der Umweltwirkungsabschätzung aus der Ökobilanz alle aufgelisteten ökologischen und energetischen Nachhaltigkeitsindikatoren mit abdecken.

Parallel wurde bei dieser Eingruppierung die in dem Energiesystemmodell Mesap/PlaNet sowie des makroökonomischen Simulationsmodells Panta Rhei vorhandenen Indikatoren in die Liste integriert.

Die Analyse nach Indikatoren, die in dem Energiesystemmodell Mesap/PlaNet sowie des makroökonomischen Simulationsmodells Panta Rhei integriert sind, ergab Indikatoren, die sowohl ökonomische und sozio-ökonomische als auch Energiesystem bezogene Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung abdecken. Im Folgenden werden, die relevanten Indikatoren näher beschrieben.

Im Mesap/PlaNet-Modell wird der ökonomische Indikator der gesamten Systemkosten sowie verschiedene Indizes zur Abbildung der Diversität des Stromsektors ermittelt. Die Systemkosten beinhalten die Ermittlung der Gesamtkosten des Energiesystems für die Sektoren Strom, Wärme und Transport durch die angestrebte energietechnologische Transformation. Darunter zusammenfassen sind, die Investitionskosten aller neu zu installierenden Anlagen zur Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugung, die fixen Betriebs- und Instandhaltungskosten sowie die variablen Betriebskosten dieser Anlagen. Hierunter fallen die Brennstoff- und CO₂-Zertifikationskosten zur Stromerzeugung. Je niedriger die gesamten Systemkosten sind, umso besser für eine nachhaltige Entwicklung des Energiesystems. Als Indizes zur Abbildung der Diversität der Stromerzeugungstechnologien des Stromsektors werden zum einen der Herfindahl-Hirschman- und der Shannon-Wiener-Index verwendet, die in den USA zur Regulierung von Marktanteilen herangezogen werden [11]. Beide Größen vereinen zwei wesentliche Elemente der Diversität. Zum einen die Vielfalt über die Anzahl unterschiedlicher Elemente einer Gesamtheit und zum anderen die Ausgewogenheit als Muster der Aufteilung der Elemente einer Gesamtheit.

Im Simulationsmodell Panta Rhei werden die sozio-ökonomischen Indikatoren des Bruttoinlandsprodukts (BIP), die Gesamtbeschäftigung, die Erwerbslosenquote, die struktu-

rellen Änderungen am Arbeitsmarkt über die Anzahl an zu- und abgebauten Arbeitsplätzen sowie die regionale Ungleichheit berechnet, die durch die Transformation des Energiesystems sich ändern. Unter dem BIP ist der Wert, der im Inland hergestellten Waren und Dienstleistungen (Wertschöpfung) zu verstehen, soweit diese nicht als Vorleistungen für die Produktion anderer Waren und Dienstleistungen verwendet werden. Um die reale wirtschaftliche Entwicklung ohne den Einfluss von Preisänderungen wiederzugeben, wird das BIP preisbereinigt angegeben. Insbesondere die getätigten Investitionen durch eine energietechnologische Transformation heben das BIP an. Je höher das BIP ausfällt, umso besser für die nachhaltige Entwicklung des Energiesystems. Die Beschäftigung ist als wichtige Grundlage der sozialen Sicherungssysteme (Renten- und Krankenkasse) sowie als individuelle Sicherung des Lebensunterhaltes anzusehen. Die Berechnung ergibt sich als Funktion des Arbeitsvolumens, welches über die Produktion aller Wirtschaftszweige ermittelt wird. Der Indikator der Erwerbslosenquote wird prozentual für jedes Jahr anhand der Differenz aus Erwerbspersonen des Referenzjahres 2017 und den Erwerbstätigen des zu berechnenden Jahres im Verhältnis zur Anzahl an Erwerbspersonen des Referenzjahres 2017 berechnet. Je geringer die Erwerbslosenquote ausfällt, umso besser für die nachhaltige Entwicklung für das Energiesystem. Die mit der energietechnologischen Transformation des Energiesystems verbundenen strukturellen Änderung am Arbeitsmarkt wird als Indikator über die Zahl der betroffenen Arbeitsplätze abgebildet, die mittels der Summen der Absolutwerte der Zu- und Abnahmen an Arbeitsplätzen in allen Wirtschaftszweigen zwischen dem Ausgangs- und dem Endjahr bezogen auf die Zahl der Erwerbstätigen des Ausgangsjahres ermittelt werden. Je geringer der Wert ausfällt, umso besser für eine nachhaltige Entwicklung des Energiesystems. Die regionale Ungleichheit wird über den gewichteten Variationskoeffizient für das Pro-Kopf-BIP der 16 Bundesländer berechnet. Eine geringere regionale Ungleichheit bedeutet einen Anstieg der nachhaltigen Entwicklung.

Zudem wurde in diesem Schritt eine weitere Analyse für die beiden Modelle durchgeführt und überprüft, ob

- der Indikator unmittelbar aus vorhandenen Modellgrößen berechnet werden kann.
- Daten für den Indikator außerhalb von den Modellen vorliegen und eingebaut werden können
- für die Abbildung des Indikators in das Modell der Input von anderen Projektpartnern notwendig ist
- die Einbindung des Indikators in das Modell als nicht möglich erachtet wird

Diese Analyse führte dazu, den Stirling-Index als Diversitätsmaß für die Stromerzeugungsinfrastruktur mit Unterstützung des flexABLE-Modells heranzuziehen, da sich der Stirling-Index im Vergleich mit dem Shannon-Wiener- oder Herfindahl-Hirschman-Index besser als Diversitätsmaß eignet. Die Dokumentation des Vorgehens sowie der dafür festgelegten Disparitätskriterien zur Berechnung der Diversität für die Stromerzeugungsinfrastruktur sind im Anhang unter dem Stirling-Index hinterlegt.

3. Festlegung von Kriterien zur Auswahl der Nachhaltigkeitsindikatoren

Trotz der unter den in 2.4 erfolgreich angewendeten Schritten zur Reduzierung der Indikatoren musste die Anzahl der Indikatoren anhand von Auswahlkriterien weiter eingegrenzt werden, um die unterschiedlichen Transformationsstrategien der zu untersuchenden zehn Energieszenarien ex-post bewerten zu können. Hierzu wurden nachfolgende Auswahlkriterien herangezogen:

- Relevanz des Indikators in Bezug auf die aktuell geführte Diskussion über eine nachhaltige Entwicklung
- Vollständiger Satz an Indikatoren berücksichtigt die ökologische, ökonomische und soziale Dimension von Nachhaltigkeit bezieht zusätzlich systembezogene Aspekte ein
- Alle Indikatoren besitzen unterschiedliche Wirkmechanismen zur quantitativen Berechnung und weisen keine Korrelation untereinander auf
- Der Indikator muss in Bezug auf den zu messenden Nachhaltigkeitsaspekt richtungssicher sein
- Die zukünftige Entwicklung des Indikators kann mit den verfügbaren Modellen FRITS, PANTA RHEI, flexABLE zufriedenstellend abgeschätzt werden
- Der Indikator wird von der Entwicklung der Angebotsseite des künftigen Technologieportfolios beeinflusst

Die Anwendung dieser Auswahlkriterien führte zu einer Reduktion von 23 Nachhaltigkeitsindikatoren, die sich aus der folgenden Tabelle 2 mit den ökonomischen, sozialen und systembezogenen Indikatoren und aus den in 2.3 beschriebenen ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren der ILCD Midpoint Methode 2.0 in Tabelle 1 zusammensetzt.

Tab. 2: Auswahl ökonomischer, systembezogener und sozialer Nachhaltigkeitsindikatoren

Nachhaltigkeitsindikator, ökonomisch	Einheit	Berechnungsmodell
Bruttoinlandsprodukt (BIP) preisbereinigt auf 2015	Mrd. € ₂₀₁₅	Panta Rhei-Modell
Regionale Ungleichheit als gewichteter Variationskoeffizient für das Pro-Kopf-BIP aller 16 Bundesländer	dimensionslos	Panta Rhei-Modell
Gesamtsystemkosten der Transformation des Energiesystems für den betrachteten Zeitraum oder Endjahr	Mrd. €	Mesap/PlaNet-Modell
Nachhaltigkeitsindikator, sozial	Einheit	Berechnungsmodell
Beschäftigung mittels Ermittlung der Arbeitsvolumina aller Wirtschaftszweige	Anzahl an Beschäftigten	Panta Rhei-Modell
Erwerbslosenquote wird prozentual für jedes Jahr anhand der Differenz von Erwerbspersonen des Referenzjahres 2017 und Erwerbstätigen des zu berechnenden Jahres im Verhältnis zur Anzahl an Erwerbspersonen des Referenzjahres 2017 berechnet.	%	Panta Rhei-Modell
Strukturelle Änderungen am Arbeitsmarkt mittels Gesamtzahl der auf- und abgebauten Arbeitsplätze zwischen dem Ausgangs- und dem Endjahr im Verhältnis zur Anzahl der Erwerbstätigen im Ausgangsjahr	%	Panta Rhei-Modell

Nachhaltigkeitsindikator, Energiesystem bezogen	Einheit	Berechnungsmodell
Stirling- Index (SI) als ein Maß für die Diversität der Stromerzeugungsinfrastruktur	dimensionslos	Mesap/PlaNet-Modell

Diese 23 Nachhaltigkeitsindikatoren, von denen 16 zu den ökologischen Indikatoren, 6 zu den sozio-ökonomischen Indikatoren zählen und ein Indikator von Energiesystem bezogener Art ist, sind im Anhang nochmals detailliert beschrieben und in Teilen auch unter Angabe der verwendeten Formeln dokumentiert.

Für die ex-post Bewertung der Transformationsstrategien des Energiesystems der zu untersuchenden zehn Energieszenarien wurden die 23 Nachhaltigkeitsindikatoren herangezogen.

Für Diskussionen mit Stakeholdern oder der praktikablen Durchführung einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA) angesichts begrenzter zeitlicher Ressourcen ist die Anzahl von 23 bzw. 22 Indikatoren zu hoch, da sonst die Handhabbarkeit, Verständlichkeit und Interpretierbarkeit zu schwierig wird. Aus diesen Gründen musste die Anzahl an Indikatoren anhand von weiteren Kriterien weiter reduziert werden.

Als zusätzliche Kriterien zur Bildung einer Teilmenge an Indikatoren dienen folgende Richtlinien:

- Anzahl der Indikatoren, die für Diskussionen mit Bürgern handhabbar sind sowie die MCDA-Ergebnisse, die auch für Nicht-Experten verständlich sein müssen.
- Darüber hinaus sollten die ausgewählten Indikatoren verständlich und eine Bedeutung für das tägliche Leben der Bürger sein
- der reduzierte Indikatorensatz soll alle Dimensionen (sozial, ökologisch, ökonomisch und systembezogen) einer nachhaltigen Entwicklung abdecken

Das Ergebnis der Anwendung dieser Richtlinien führt zu einer Reduktion auf 13 Nachhaltigkeitsindikatoren, die für die MCDA sowie die Discrete-Choice-Experimente zur Quantifizierung von Bürgerpräferenzen bezüglich energietechnologisch unterschiedlich ausgestalteter Energieszenarien verwendet wurden.

Eine Zusammenstellung aller Nachhaltigkeitsindikatoren sowie deren Teilmengen, die in den Discrete-Choice-Experimenten und in der MCDA eingesetzt wurden, ist in der folgenden Abbildung 2 dargelegt.

Kategorie	Sub-Kategorie	Indikator	Einheit	berechnet mit	für MCDA	für DCE	Methode/Referenz
Ökologisch	Klimawandel	Klimawandel	kg CO ₂ eq.	FRITS	CUM	X	ILCD 2018
		Süßwasser & terr. Versau.	mol H ⁺ eq.	FRITS			ILCD 2018
	Ökosystemqualität	Süßwasser Ökotoxizität	CTUe	FRITS			ILCD 2018
		Süßwasser Eutrophierung	kg P eq.	FRITS			ILCD 2018
		Slazwasser Eutrophierung	kg N eq.	FRITS			ILCD 2018
		Terrest. Eutrophierung	mol N eq.	FRITS			ILCD 2018
		Dissipated water	m ³ Wasser eq.	FRITS			ILCD 2018
	Ressourcen	Landnutzung	Punkte	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018
		Fossile Energieträger (KEA)	MJ	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018
		Minerale und Metalle	kg Sb eq.	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018 (aktualisiert)
		Krebserregende Effekte	CTUh	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018
	Menschliche Gesundheit	Nicht-Krebserregende Effekte	CTUh	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018
		Ionisierende Strahlung	kBq U235 eq.	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018
		Ozonschichtzerstörung	kg CFC-11 eq.	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018
		Photochem. Ozonbildung	kg NMVOC eq.	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018
		Atemwegsbelast./Feinstaub	Krankheitsfälle	FRITS	CUM	AGG	ILCD 2018
Sozio-ökonomisch		Systemkosten	Mrd. €	MESAP	CUM	X	
		BIP	Mrd. €	PANTA RHEI			
		Strukturelle Änderung	-	PANTA RHEI			
	Beschäftigung	Regionale Ungleichheit	-	PANTA RHEI			
		Beschäftigte Personen	-	PANTA RHEI		X	
Systembezogen		Erwerbslosenquote	%	PANTA RHEI	X		
		Versorgungssicherheit der Stromversorgung (SI-Index)	-	flexABLE und Tech. Charak.	X	(X)	MCDA: Stirling Index DCE: Expertenurteil

Abb. 2 Überblick des gesamten Satzes an Nachhaltigkeitsindikatoren sowie die Teilmengen, die in den Discrete-Choice-Experimenten (DCE) und der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA) genutzt wurden. "AGG" zeigt an, dass DCE einen aggregierten Indikator für die menschliche Gesundheit und die Ressourcen nutzt. CUM" bedeutet, dass die kumulierten Werte für den Zeitraum 2021-2050 in der MCDA eingesetzt werden

4. Literatur

- [1] UN Department of Economic and Social Affairs (UN): Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. New York, 2007; verfügbar unter: <https://sustainable-development.un.org/content/documents/guidelines.pdf>, zuletzt geprüft 17.03.2021
- [2] United Nations (UN): The sustainable development goals report 2016. New York, 2016; verfügbar unter: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2016/The%20Sustainable%20Development%20Goals%20Report%202016.pdf>, zuletzt geprüft am 17.03.2021
- [3] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Towards Green Growth: Monitoring Progress: OECD Indicators. 2011, verfügbar unter: <http://www.oecd.org/greengrowth/48224574.pdf>, zuletzt geprüft 17.03.2021
- [4] Deutsche Bundesregierung: 10 Jahre Nachhaltigkeit „Made in Germany“: Die Nationale Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin, 2012, verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/re-source/blob/974430/388826/b6d6406a5aac71c04d7433da38845faa/2012-05-09-kurzpapier-zum-fortschrittsbericht-2012-barrierefrei-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft 17.03.2021
- [5] Deutsche Bundesregierung: Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie - Neuauflage 2016. Berlin, 2017, verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/re-source/blob/974430/318676/3d30c6c2875a9a08d364620ab7916af6/2017-01-11-nachhaltigkeitsstrategie-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft 22.03.2021
- [6] Kopfmüller, J., et al., Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet: Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. Global zukunftsfähige Entwicklung. Berlin, 2001, Edition Sigma 432
- [7] Rösch, C., et al., Indicator-based sustainability assessment of the German Energy System and its transition. Karlsruhe, 2018, KIT Scientific Publishing 174
- [8] Quitzow, R., et al.: Multikriterieller Bewertungsansatz für eine nachhaltige Energiewende: Von der Analyse zur Entscheidungsfindung mit ENavi. Potsdam, 2018, Geschäftsstelle des Kopernikus-Projekts Energiewende-Navigationssystem (ENavi); Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), 53 p., verfügbar unter: <https://doi.org/10.2312/iass.2018.011>, zuletzt geprüft 17.07.2021
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende. Die Energie der Zukunft: Berichtsjahr 2016. Berlin, 2018 verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=39, zuletzt geprüft 17.07.2021.
- [10] Gleich, A.v., et al.: Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie, in Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien. Projekt nordwest2050, Bericht Teil 1., K. Fichter, et al., Herausgeber, Bremen/Oldenburg, 2010
- [11] Stirling, A.: A general framework for analysing diversity in science. Technology and Society, 2007, 4(15): p. 707–719
- [12] Stirling, A.: Multicriteria diversity analysis: A novel heuristic framework for appraising energy portfolios. Energy Policy, 2010, 38(4): p. 1622-1634

- [13] Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung. Erster Bericht: Nachhaltige Energieversorgung auf liberalisierten und globalisierten Märkten: Bestandsaufnahme und Ansatzpunkte. 2001, verfügbar unter: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/14/075/1407509.pdf>, zuletzt geprüft 17.03.2021
- [14] International Atomic Energy Agency (IAEA): Energy indicators for sustainable development: guidelines and methodologies. Wien, 2005, verfügbar unter: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1222_web.pdf, zuletzt geprüft 22.03.2021
- [15] Vera, I. and L. Langlois: Energy indicators for sustainable development. Energy, 2007, 32(6): p. 875–882
- [16] Hirschberg, S., et al.: Final set of sustainability criteria and indicators for assessment of electricity supply options. New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS). 2008
- [17] Internationale Länderkommission Kerntechnik (ILK): Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergie und anderer Technologien zur Stromerzeugung. 2004, verfügbar unter: https://umwelt-online.de/regelwerk/energie/laender/he/il16_ges.htm zuletzt geprüft 17.03.2021
- [18] Lensa, W.v., ed.: RED-IMPACT: Impact of partitioning, transmutation and waste reduction technologies on the final nuclear waste disposal; synthesis report. Schriften des Forschungszentrums Jülich: [...], Reihe Energie & Umwelt. 2008, Forschungszentrum, Zentralbibliothek: Jülich 178.
- [19] Stamford, L. and A. Azapagic: Sustainability indicators for the assessment of nuclear power. Energy, 2011, 36(10): p. 6037–6057
- [20] International Organisation for Standardisation (ISO): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006), Genf, Schweiz, 2006.
- [21] International Organisation for Standardisation (ISO): Umweltmanagement - Ökobilanz –Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006), Genf, Schweiz, 2006
- [22] Jolliet, O., et al.: The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative. Int. Journal of Life Cycle Assessment, 2004, 9(6)
- [23] Buchgeister, J.: Übersicht über Umweltindikatoren, Modelle und Methoden der Umweltwirkungsabschätzung in der Ökobilanzierung. umwelt-medizin-gesellschaft, 2012, 25(1): S. 12- 21
- [24] Bare, J.C., et al.: Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. Int. Journal of Life Cycle Assessment, 2000, 5(6)
- [25] European Commission Joint Research Centre (JRC): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact assessment in the European context – based on existing environmental impact assessment models and factors. Ispra, Italien, 2011
- [26] Fazio, S., et al., Supporting information to the characterisation factors of the recommended EF Life Cycle Impact Assessment method - new models and differences with ILCD, in JRC Technical Reports. Ispra, Italien, 2018

- [27] van Oers, L., Guinée, J.B., Heijungs, R.: Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data. *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, 2020, 25(2): p. 294-308
- [28] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2014: Synthesis Report - Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014
- [29] World Meteorological Organisation (WMO): Scientific assessment of ozone depletion: 1998. Report / World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project. 1999, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. 650
- [30] Rosenbaum, R.K., et al.: USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13(7): p. 532-546
- [31] Fantke, P. et al.: Health impacts of fine particulate matter. In: UNEP (Hrsg): Global guidance for life cycle impact assessment indicators, 2016, Volume 1, S 76–99, verfügbar unter: <https://www.lifecycleinitiative.org/training-resources/global-guidance-lcia-indicators-v-1/>
- [32] van Zelm, R., et al.: European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(3): p. 441-453
- [33] Seppälä, J., et al.: Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11(6): p. 403-416
- [34] Posch, M., et al.: The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13(6): p. 477-486
- [35] Struijs, J., et al., Aquatic Eutrophication. Chapter 6, in Goedkoop, Mark; Heijungs, Reinout.; Huijbregts, Mark A. J.; De Schryver, An; Struijs, Jaap; van Zelm. Rosalie. ReCiPE 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation Factors. 2008 verfügbar unter: <https://www.rivm.nl/documenten/a-lcia-method-which-comprises-harmonised-category-indicators-at-midpoint-and-endpoint>, zuletzt geprüft 19.03.2021
- [36] Frischknecht, R., et al., Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20(2): p. 159-189
- [37] Bos, U., et al., LANCA. Characterization Factors for Life Cycle Impact Assessment, Version 2.0. 2016, Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- [38] van Oers, L., et al. Abiotic resource depletion in LCA. Improving characterisation factors from abiotic depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. 2002, verfügbar unter: https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/report_abiotic_depletion_web.pdf, zuletzt geprüft 22.03.2021
- [39] Boulay, A.-M., et al., The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23(2): p. 368-378
- [40] Bundesnetzagentur: Kraftwerksliste, Bundesnetzagentur (Hrsg.), 2020

- [41] Matthes, F. et al.: Germany's Electric Future. Coal phase-out 2035. WWF Studie, Berlin 2017
- [42] Staffell, I., et al.: The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 2019. 12(2): p. 463-491
- [43] IRENA: Hydropower. in *Renewable energy technologies: Cost analysis series*, IRENA (Hrsg.), 2012 IRENA
- [44] Wirth, H.: Recent Facts about Photovoltaics in Germany. FhG ISE, Freiburg 2020
- [45] Kost, C. et al.: Levelized cost of electricity renewable energy technologies. FhG ISE, Freiburg 2018
- [46] Ziegler, L. et al.: Lifetime extension of onshore wind turbines: A review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 82: p. 1261-1271
- [47] Markewitz, P., M. Robinius, and D. Stolten, The Future of Fossil Fired Power Plants in Germany - A Lifetime Analysis. *Energies*, 2018. 11: p. 1616
- [48] Nuclear Energy A. (NEA) and International Atomic Energy A. (IAEA): Uranium 2020: Resources, Production and Demand. OECD Publishing, Paris, France 2021
- [49] Flach, B., Lieberz, S., Bolla, S.: EU Biofuels Annual 2019. USDA Foreign Agricultural Service 2019
- [50] Bundesnetzagentur: SMARD – Strommarktdaten. Bundesnetzagentur (Hrsg.), 2020
- [51] Danish Energy Agency (DEA): Data sheet for electricity and district heat production - updated April 2020. 2020
- [52] Gonzalez-Salazar, M.A., Kirsten, T., Prchlik, L.: Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 82: p. 1497-1513
- [53] Saur, G. et al.: Stationary Fuel Cell Evaluation. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2016
- [54] Blengini, G.A. et al.: Study on the EU's list of Critical Raw Materials - Executive Summary. European Commission, 2020
- [55] Basosi, R. et al.: Life Cycle Analysis of a Geothermal Power Plant: Comparison of the Environmental Performance with Other Renewable Energy Systems. 2020. 12(7): p. 2786
- [56] Carrara, S. et al.: Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. 2020
- [57] Spath, P.L., Mann, M.K., Kerr, D.R.: Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1999
- [58] Moss, R. et al.: Critical metals in the path towards the decarbonisation of the EU energy sector Assessing rare metals as supply-chain bottlenecks in low-carbon energy technologies. Joint Research Center (JRC), 2013
- [59] Spath, P.L. and Mann, M.K.: Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2000

- [60] Mann, M.K. and Spath, P.L.: Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle System. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1997

5. Anhang

Ausgewählte Ökologische Indikatoren

Klimawandel

Erhöhte Konzentrationen von Gasen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan oder Lachgas verursachen durch den sogenannten Strahlungsantrieb, der in W/m² für jedes Treibhausgas gemessen wird, höhere Temperaturen in der Troposphäre – den anthropogenen Treibhausgaseffekt. Das globale Treibhausgaspotenzial (engl.: Global Warming Potential, GWP) ist auf Kohlendioxid normiert und wird deshalb in kg CO₂-Äquivalenten angegeben.

Die Faktoren dieser Wirkungskategorie wurden mit leichten Anpassungen nach dem GWP100-Modell (Verweilzeit der Treibhausgase von 100 Jahren) berechnet [28]. Neben der Hauptmethode, die alle charakterisierten Stoffe dieser Kategorie enthält, stehen drei Unterkategorien für fossile, biogene und Landnutzungsemissionen zur Verfügung.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): menschliche Gesundheit, biotische und abiotische natürliche Umwelt (Ökosystem)

Gesamtemissionen weltweit 2010: 5,35E+13 kg CO₂-Äquivalente

Stratosphärische Ozonzerstörung

Die Ozonschicht in der Stratosphäre schützt die Menschheit vor Ultravioletter-Strahlung. Durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und anderen halogenhaltigen Kohlenwasserstoffe wird die Konzentration an Ozon in der Stratosphäre reduziert, was wiederum zu einer höheren UV-B-Strahlung führt, die bei Menschen vermehrt zu Hautkrebs und grünem Star führt und auch Pflanzen schädigen kann. Der Indikator gibt den Beitrag eines Stoffes zur Reduzierung der Ozonkonzentration in Relation zu Trichlorfluormethan (CFC11) in der Stratosphäre an. Die Einheit wird in kg Trichlorfluormethan-Äquivalente (kg CFC11-Äquivalente) angegeben.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): menschliche Gesundheit, biotische und abiotische natürliche Umwelt (Ökosystem)

Gesamtemissionen weltweit 2010: 1,16E+08 kg CFC-11-Äquivalente

Humantoxizität, krebserregende und nicht-krebserregende Effekte

Toxische Stoffe können sowohl direkt über die Luft oder dem Wasser als auch indirekt über die Nahrung aufgenommen werden und die menschliche Gesundheit beeinträchtigen. Diese sind abhängig von der Konzentration. Die gewählte Methode berücksichtigt Dosis, Exposition und Wirkung von Chemikalien auf Menschen. Es wird hier zwischen krebserregenden und nicht- krebserregenden Wirkungen unterschieden. Die Einheit ist eine vergleichbare toxische Einheit auf den Menschen (Comparative Toxic Unit for humans, CTUh).

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): menschliche Gesundheit

Gesamtemissionen (krebserregend) weltweit 2010: 2.66E+05 CTUh

Gesamtemissionen (nicht- krebserregend) weltweit 2010: 3,27E+06 CTUh

Atemwegsbelastung / Feinstaub

Durch die Emission von primären feinen Partikeln und die Bildung von sekundären Partikeln steigt die Staubkonzentration in der Umgebung an. Hierbei entstehen sekundäre Partikel durch Aerosolbildung auf Basis der anorganischen Stickoxid- und Schwefeloxid-Emissionen in die Luft. In der Regel gilt, je kleiner die Partikel sind, desto gefährlicher sind diese für die menschliche Gesundheit, da sie tiefer in die Lunge eintreten können und zu Schädigungen am Lungengewebe führen. Das Modell zielt darauf ab, die Schädigung der menschlichen Gesundheit durch Außen- und Innenraumemissionen von primären und sekundären PM_{2,5}-Emissionen in städtischen und ländlichen Gebieten abzubilden. Der Wirkungsindikator charakterisiert die Veränderung der Krankheitsfälle aufgrund von PM_{2,5}-Feinstaubemissionen. Hierbei werden den Stickoxid- und Schwefeloxidemissionen entsprechende PM_{2,5}-Emissionswerte zugeordnet, um auch deren Auswirkungen einzubeziehen. Der Indikator wird in der Einheit Krankheitsfälle (disease incidences) angegeben.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): menschliche Gesundheit

Gesamtemissionen weltweit 2010: 4,28E+06 disease incidences

Photochemische Ozonbildung

Durch Verbrennungsprozesse werden Emissionen freigesetzt, die u.a. flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds; VOC) enthalten. Durch die Sonneneinstrahlung läuft unter Einfluss von Stickoxiden eine Oxidation ab, wodurch es zur Bildung von Ozon in der Troposphäre kommt. Erhöhte Ozonwerte in der Troposphäre können zu Atemwegsproblemen beim Menschen führen und Pflanzen schädigen. Die Einheit ist kg NMVOC-Äquivalente (non-methane volatile organic compounds; NMVOC).

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): menschliche Gesundheit

Gesamtemissionen weltweit 2010: 2,80E+11 kg NMVOC-Äquivalente

Versauerung, terrestrisch und aquatisch

Vor allem bei Verbrennungsprozessen werden Emissionen wie Stickoxide oder auch Schwefeloxide freigesetzt, die in Verbindung mit dem in der Troposphäre befindlichen Wasserdampf zu einer versauernden Substanz reagieren und durch Niederschläge zu saurem Regen auf die Erdoberfläche führen. Dadurch kommt es zu Waldschäden, Korrosion von Metallen, zum Fischsterben und zur Versauerung von Böden und aquatischen Flächen. Das Versauerungspotenzial beschreibt den Beitrag eines Stoffes zur Entstehung von saurem Regen. Es wird in Mol Wasserstoffionen-Äquivalente (mol H⁺-Äquivalente) angegeben.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): biotische und abiotische natürliche Umwelt (Ökosystem)

Gesamtemissionen weltweit 2010: 3,83E+11 mol H⁺-Äquivalente

Eutrophierung, terrestrisch

Die Auswaschung von stickstoff- und phosphorhaltigen Düngemitteln führen zu einer Nährstoffanreicherung in Böden. Durch den Eintrag im Boden kommt es mit der Zeit durch Niederschläge zur Anreicherung der Nährstoffe ins Grundwasser. Hier werden hauptsächlich stickstoffhaltige Substanzen nachgewiesen. Das Eutrophierungspotenzial beschreibt den Beitrag eines Stoffes zur kumulierten Überschreitung des kritischen Belastungswerts der Eutrophierung im Boden beizutragen. Es wird in mol Stickstoff-Äquivalente (mol N-Äquivalente) angegeben.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): biotische und abiotische natürliche Umwelt (Ökosystem)

Gesamtemissionen weltweit 2010: 1,22E+12 mol N-Äquivalente

Eutrophierung, Süß- und Salzwasser

Die Auswaschung von stickstoff- und phosphorhaltigen Düngemitteln sowie von Haushalts- und Industrieabwässer führen zu einer Nährstoffanreicherung in Seen, Meeren und Flüssen. An sich sind diese Nährstoffe limitierende Faktoren für das Wachstum in einem Ökosystem. Doch durch übermäßigen Eintrag dieser Stoffe in aquatischen Ökosystemen, kommt es auch zu übermäßigem Wachstum von Algen.

Süßwasser

In Seen und Flüssen ist für die Überdüngung hauptsächlich Phosphor verantwortlich, was zu einem schnellen Algenwachstum führt. Der Abbau der daraus resultierenden Biomasse führt im Wasser zum Sauerstoffmangel, der zur Schädigung von Fischen führen kann. Das Süßwassereutrophierungspotenzial wird in kg Phosphor-Äquivalente (kg P-Äquivalente) angegeben.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): biotische und abiotische natürliche Umwelt (Ökosystem)

Gesamtemissionen weltweit 2010: 5,06E+09 kg P-Äquivalente

Salzwasser

In Salzwasser (primär Meere) ist für die Überdüngung hauptsächlich Stickstoff verantwortlich, was zu einem schnellen Algenwachstum führt. Der Abbau der daraus resultierenden Biomasse kann im Meer zu Totzonen führen. Das Eutrophierungspotenzial im Salzwasser wird in kg Stickstoff-Äquivalente (kg N-Äquivalente) angegeben.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): biotische und abiotische natürliche Umwelt (Ökosystem)

Gesamtemissionen weltweit 2010: 1,95E+11 kg N-Äquivalente

Ionisierende Strahlung, menschliche Gesundheit

Ionisierende Strahlung verursacht unterschiedlichste molekulare Veränderungen. In der DNA von Keim- oder Körperzellen kann eine einzelne Veränderung – wenn auch mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit – eine Wirkungskette auslösen und sich in Form von verschiedenen Krebsarten oder Erbgutschäden auswirken. Der gewählte Indikator enthält Schadensfaktoren für Radionuklidemissionen, die niedrig dosierte ionisierende Strahlung verursachen. Die Einheit ist Kilobecquerel Uran 235-Äquivalente (kBq U235eq).

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): menschliche Gesundheit

Gesamtemissionen weltweit 2010: 2,04E+12 kBq U235-Äquivalente

Landnutzung

Die Wirkungskategorie Landnutzung beschreibt eine Änderung der Ökosystemleistung durch Flächeninanspruchnahme und Flächenumwandlung z.B. durch landwirtschaftliche Produktion, die Mineralextraktion sowie die Ansiedlung von Menschen. Die Flächenumwandlung (land transformation, land use change) bezieht sich auf eine Änderung des vorherigen Flächenzustands und dessen Qualität hinsichtlich einer natürlichen Umwelt für Biodiversität und Biomassenproduktion zu sorgen. Nach der Flächenumwandlung kann der vorherige Flächenzustand wiederhergestellt werden, wenn eine Fläche renaturiert wird. Die Flächeninanspruchnahme (land occupation, land use) bezieht sich auf die Wirkungen, die während der Nutzung im Vergleich zum jeweiligen Referenzzustand auftreten. Der gewählte Indikator beschreibt einen Index, der die Eigenschaften Erosionsresistenz, mechanische Filtration, Grundwasserneubildung und biotische Produktion berücksichtigt. Das Modell berücksichtigt verschiedene Indikatoren für eine Reihe von Bodeneigenschaften, die nach dem LANCA-Modell berechnet werden [37]. Diese Indikatoren werden zusammengefasst und neu skaliert, um einen dimensionslosen Bodenqualitätsindex ausgedrückt in Punkten zu erhalten, der die verschiedenen vom Modell bewerteten Eigenschaften berücksichtigt. Das Modell weist sowohl globale als auch räumlich differenzierte Charakterisierungsfaktoren auf Länderebene zu.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): biotische und abiotische natürliche Umwelt (Ökosystem)

Bodenqualitätsindex weltweit 2010: 1,98E+16 Punkte

Ressourcenzerstörung, fossile Energieträger

Der Indikator fasst alle fossilen Energieträger plus Uran zusammen und wird in der Energie-Einheit Megajoule (MJ) ausgewiesen.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): biotische und abiotische natürliche Ressourcen

Gesamtnutzung weltweit 2010: 4,50E+14 MJ

Ressourcenzerstörung, Minerale und Metalle

Der Indikator Abiotic Resource Depletion Potential (ADP) umfasst mineralische und metallische Rohstoffe, die abiotische und nicht-erneuerbar sind. Der Indikator berücksichtigt die abnehmende Verfügbarkeit von Rohstoffbeständen (Knappheit) durch Division der weltweiten jährlichen Förderrate des Rohstoffs durch die ultimative Reserve dieses Rohstoffs zum Quadrat. Die ultimative Reserve ist die Menge eines Elements, die sich schätzungsweise insgesamt in der Erdkruste befindet. Die rohstoffspezifischen Knappheitswerte werden auf den Knappheitswert von Antimon referenziert, so dass der Wirkungsfaktor die Einheit kg Antimon-Äquivalente (kg Sb-Äquivalente) hat.

Für die Aktualisierung des Indikators wurde zum einen die Berechnung der ultimativen Reserve des Rohstoffs auf Basis des neuesten Stands des Wissens in der Geologie zur Bestimmung der geologischen Reserve des Rohstoffes in der Erdkruste erneuert [27]. Zum anderen wurden die kumulativen jährlichen Förderraten der Mineralien und Metalle des Zeitraums von 1970 bis 2015 ermittelt, um die Schwankungsbreiten einer jährlichen Förderrate zu vermeiden [27]. Durch die Aktualisierung der jährlichen Förderraten kann der Indikator zu den bisherigen 48 Rohstoffen 28 weitere Rohstoffe in die Auswirkungen auf die Ressourcenzerstörung miteinbeziehen. Darunter befinden sich für Energietechnologien relevante kritische Rohstoffe wie z.B. Neodym, Dysprosium, Rhodium, Ruthenium und Iridium. Für die in der Energiewirtschaft in Massen eingesetzten metallischen Rohstoffe wie z.B. Aluminium, Eisen, Kupfer, Nickel und Silizium ergeben sich durch die Aktualisierung für das abiotische Ressourcenzerstörungspotenzial deutliche Steigerungen um mindestens einen Faktor von 10 und höher.

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): biotische und abiotische natürliche Ressourcen

Produktion mineralischer und metallischer Rohstoffe weltweit 2010: 5,12E+09 kg Sb-Äquivalente

Wasserknappheit

Die Entnahme von Grundwasser oder von Wasser aus Seen und Flüssen kann zu Wasserknappheit innerhalb von Ökosystemen führen. Obwohl Wasser an sich als erneuerbar anzusehen ist, kann seine Verfügbarkeit jedoch saisonal und regional sehr unterschiedlich ausfallen. Somit führt dieselbe Entnahme von Wasser in verschiedenen Regionen zu mehr oder weniger Wasserknappheit. Nach dem AWARE-Modell wird die verbrauchende Wassernutzung auf Länderebene bewertet, die in der Einheit Kubikmeter entbehrte Wasser-Äquivalente (m^3 water-equivalents deprived) angegeben wird [39].

Betroffene Umweltschutzgüter (Wirkungs-Endpunkte): biotische und abiotische natürliche Ressourcen

Wassernutzung weltweit 2010: 7,91E+13 m^3 entbehrte Wasser-Äquivalente

Ausgewählte Ökonomische Indikatoren

Systemkosten

Der Indikator Systemkosten beinhaltet die Ermittlung der Gesamtkosten des Energiesystems für die Sektoren Strom, Wärme und Transport durch die angestrebte energietechnologische Transformation der Energiewende. Unter den Systemkosten zu fassen sind, die Investitionskosten aller neu zu installierenden Anlagen zur Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugung, die fixen Betriebs- und Instandhaltungskosten sowie die variablen Betriebskosten dieser Anlagen. Hierunter fallen die Brennstoff- und CO₂-Zertifikationskosten zur Stromerzeugung. Je niedriger die gesamten Systemkosten sind, umso besser für eine nachhaltige Entwicklung des Energiesystems. Die Einheit ist Mrd. Euro.

Bruttoinlandsprodukt (BIP)

Unter dem Indikator des BIP ist der Wert, der im Inland hergestellten Waren und Dienstleistungen (Wertschöpfung) zu verstehen, soweit diese nicht als Vorleistungen für die Produktion anderer Waren und Dienstleistungen verwendet werden. Insbesondere die getätigten Investitionen durch eine energietechnologische Transformation heben das BIP an. Um die reale wirtschaftliche Entwicklung ohne den Einfluss von Preisänderungen wiederzugeben, wird das BIP preisbereinigt auf das Jahr 2015 bezogen angegeben.

Je höher das BIP ausfällt, umso besser für die nachhaltige Entwicklung des Energiesystems führt. Die Einheit ist Mrd. Euro preisbereinigt auf das Jahr 2015.

Regionale Ungleichheit in %

Die regionale Ungleichheit wird über den gewichteten Variationskoeffizient für das Pro-Kopf-BIP der 16 Bundesländer berechnet. Eine geringere regionale Ungleichheit bedeutet einen Anstieg der nachhaltigen Entwicklung. Die Einheit des Indikators ist Prozent. Die Berechnungsformel sieht folgendermaßen aus:

$$V_g = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{P} (y_i - Y)^2}}{Y}$$

mit

P bzw. p_i = Pro-Kopf-BIP im Bundesland i

Y bzw. y_i = Bevölkerung im Bundesland i

Ausgewählte soziale Indikatoren

Gesamtbeschäftigung

Der Indikator der Gesamtbeschäftigung ist als wichtige Grundlage der sozialen Sicherungssysteme (Renten- und Krankenkasse) des Staates sowie als individuelle Sicherung

des Lebensunterhaltes anzusehen. Die Berechnung ergibt sich als Funktion des Arbeitsvolumens, welches über die Produktion aller Wirtschaftszweige ermittelt wird. Der Indikator wird als Absolutwert für jedes Jahr angegeben.

Erwerbslosenquote

Der Indikator der Erwerbslosenquote wird prozentual für jedes Jahr anhand der Differenz aus Erwerbspersonen des Referenzjahres 2017 und den Erwerbstätigen des zu berechnenden Jahres im Verhältnis zur Anzahl an Erwerbspersonen des Referenzjahres 2017 entsprechend nachfolgender Formel berechnet.

$$\text{Erwerbslosenquote (t)} = \frac{\text{Erwerbspersonen (2017)} - \text{Erwerbstätige(t)}}{\text{Erwerbspersonen (2017)}} * 100$$

Als Erwerbstätige Personen werden sowohl beschäftigte Arbeitnehmer als auch Beamte sowie die Selbstständigen inklusive mithelfende Angehörige gezählt.

Strukturelle Änderung am Arbeitsmarkt

Der Indikator der strukturellen Änderung am Arbeitsmarkt in Folge der energietechnologischen Transformation der Energiewende wird über die gesamte Anzahl an betroffenen Arbeitsplätze abgebildet, die mittels der Summen der Absolutwerte der Zu- und Abnahmen an Arbeitsplätzen in allen Wirtschaftszweigen zwischen dem Ausgangs- und dem Endjahr bezogen auf die Zahl der Erwerbstätigen des Ausgangsjahres ermittelt werden. Je geringer der Wert ausfällt, umso besser für eine nachhaltige Entwicklung des Energiesystems. Die Einheit des Indikators ist Prozent.

Ausgewählter Energiesystem bezogener Indikator

Stirling-Index als Maß für die Diversität der Stromerzeugungsinfrastruktur

Der Stirling-Index wird als Indikator für die Diversität der Stromerzeugungstechnologien herangezogen. Hierbei fließen drei allgemeine Faktoren in die Ermittlung der Diversität ein. Zum einen die Vielfalt („variety“) an Technologieelementen innerhalb der Gesamtheit. Die Ausgewogenheit („balance“) als Muster der Verteilung an der Gesamtheit sowie die Verschiedenheit („disparity“) durch den Grad der Unterschiedlichkeit an Eigenschaften der Elemente [11, 12]. Je höher der Wert des Stirling-Indexes ist umso höher ist das Maß der Diversität. Durch eine höhere Diversität steigt die Resilienz der Stromerzeugungsinfrastruktur an und somit die nachhaltige Entwicklung des Energiesystems. Die Berechnungsformel ist:

$$SI = \sum_{j,k;j \neq k} (d_{jk})^{\alpha} \cdot (p_j \cdot p_i)^{\beta}$$

mit

- d_{jk} : Grad der Unterschiedlichkeit („disparity“) der Elemente j und k
- p_j : Anteil des Elements i an der Gesamtheit der Elemente
- α, β : Gewichtungsfaktoren, die entweder 0 oder 1 gesetzt werden

Zur Messung der Vielfalt von Stromerzeugungstechnologien werden Kriterien in Bezug auf die physische Anlage, den verwendeten Brennstoff, die Erzeugungsmerkmale der Anlage und ihre ökologischen und sozialen Auswirkungen berücksichtigt. Die Auswirkungen auf die Umwelt, die sozialen Auswirkungen und einige wirtschaftliche Auswirkungen werden jedoch im Rahmen der MCDA berücksichtigt, bei der die Messung der Vielfalt selbst nur ein Kriterium ist, so dass diese von den Diversitätsmessungen ausgeschlossen worden sind.

Für die physische Anlage wurden die durchschnittliche Anlagenlebensdauer und die durchschnittliche Anlagenkapazität (basierend auf [40]) sowie die durchschnittliche Lebensdauer (abgeleitet aus [41-47]) berücksichtigt. Zur Beschreibung der Diversität zwischen den Brennstoffen wurde deren Herkunft als Anteil der importierten Brennstoffe und der Länder, die importierte Brennstoffe liefern, gemessen [48, 49]. Zur Beschreibung der Diversität zwischen den Erzeugungsmöglichkeiten wurden sieben Kriterien abgeleitet, die aus der Quelle stammen.

Wir leiteten vier Kriterien aus empirischen Erzeugungsdaten für fünf Jahre aus der SMARD-Datenbank für den Zeitraum 2015-2019 ab [50]. Das erste Kriterium war die Korrelation der durchschnittlichen täglichen Erzeugungskurve für jede Energiequelle mit der durchschnittlichen täglichen Nachfrage, mit Zeitschritten von 15 Minuten. Das zweite Kriterium war wiederum die Korrelation der durchschnittlichen Erzeugung mit der durchschnittlichen Nachfrage, jedoch berechnet für die durchschnittliche kumulierte tägliche Erzeugung und Nachfrage im Laufe des Jahres. Diese beiden Kriterien messen die Nutzbarkeit der von jedem Kraftwerk erzeugten Energie. Als Nächstes haben wir die Selbstkorrelation der Erzeugungsdaten gemessen, und zwar mit einem Zeitversatz von einem Tag und einem Jahr. Wie beim vorhergehenden Kriterium wurden die täglichen Daten mit einem Stichprobenzeitraum von 15 Minuten berechnet, und die jährlichen Daten wurden anhand der kumulierten täglichen Erzeugung berechnet. Diese beiden Kriterien messen die "Vorhersagbarkeit" oder "Zuverlässigkeit" der Stromerzeugung aus jeder Quelle. Alle vier Korrelationen wurden mit dem Pearson-Korrelationskoeffizienten berechnet. Zusätzlich wurden einige Indikatoren ausgewählt, um die Flexibilität des Kraftwerks zu beschreiben: die Rampenfähigkeit oder die maximale Änderungsrate der Stromerzeugung, die Mindestbetriebslast und der Kapazitätsfaktor oder der

der durchschnittliche Prozentsatz der erzeugten Nennleistung (basierend auf [51-53]). Zusammen ergeben diese sieben Kriterien ein abgerundetes, quantifiziertes Bild von der Vorhersagbarkeit, Nutzbarkeit und Flexibilität der Energiequellen. Schließlich sind noch zwei wirtschaftliche Kriterien einbezogen worden, die in der größeren MCDA nicht berücksichtigt wurden. Das erste war die Marktkonzentration der Anbieter, die mit dem Herfindahl-Hirschman Index aus einer Liste aller deutschen Kraftwerke berechnet wurde (basierend auf [40]). Zudem wurde ein Kriterium einbezogen, das auf dem Bedarf jedes Energieträgers an kritischen Rohstoffen basiert. Die EU listet 30 solcher kritischen Rohstoffe auf, die in Zukunft potenzielle Risiken in der Lieferkette bergen [54]. Wir haben uns für die Messung der Gesamtzahl an kritischen Rohstoffen entschieden.

Schließlich haben wir ein Kriterium einbezogen, das auf dem Bedarf jedes Energieträgers an kritischen Rohstoffen basiert.

Die EU listet 30 solcher kritischen Rohstoffe auf, die in Zukunft potenzielle Risiken in der Lieferkette bergen [54]. Es wurde entschieden, die Gesamtzahl der für jeden Energieträger benötigten kritischen Rohstoffe zu messen, ohne die Mengen zu berücksichtigen, da keine zuverlässigen Daten über die benötigten Mengen der einzelnen Materialien vorliegen und es kein einfaches Maß gibt, um einen Vergleich der um mehrere Größenordnungen unterschiedlichen Materialmengen zu aggregieren. Diese Materialanforderungen wurden aus einer Reihe von Studien übernommen [55-60].