



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Der Einfluss der Knappheit seltener Erden auf die Kosten nachhaltiger Energiesysteme“

verfasst von / submitted by

Nomi Parnitzke, BA

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2018 / Vienna 2018

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 915

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Betriebswirtschaft

Betreut von / Supervisor:

Ao. Univ.-Prof. Dr. Jörg Borrmann

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit des Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.



Nomi Parnitzke

Wien, am 20. September 2018

Zusammenfassung

Der voranschreitende Klimawandel und die dadurch motivierte Energiewende sind aktuelle Erscheinungen unserer Zeit und beeinflussen die künftige Entwicklung der Energiegewinnung maßgeblich. Die größte Menge an erneuerbarer Energie wird derzeit durch Windkraftanlagen erzeugt, die somit einen wichtigen Anteil an diesem Prozess leisten. Für die effizienteste Antriebstechnologie in Windturbinen werden seltene Erden benötigt, die unter großem Aufwand und der Monopolstellung Chinas abgebaut werden. Durch Liefer- und Preisschwankungen entsteht eine Bedrohung für die Produktion von Windkraftanlagen, deren Schweregrad in der vorliegenden Masterarbeit anhand von Experteninterviews untersucht wird. Die befragten Personen haben einen beruflichen oder wissenschaftlichen Bezug zu dem Thema und bewerten die Situation der Abhängigkeit unterschiedlich.

Abstract

Climate change as well as the energy revolution have an increasing impact on the development of the current way of energy production. At the moment, wind turbines are representing the dominating renewable energy system and hence play an important role for this process. To build the most efficient wind energy plants, producers implement rare earths within the drive system. China has the monopoly on rare earths which are being extracted under an enormous effort. Prices and supply of rare earths are subject to significant changes and might harm the expansion of renewable energy systems. The purpose of this master thesis is to determine the degree of severity regarding the wind industry's dependence on rare earths by conducting expert interviews. The interviewed persons assessed the rare earths' impact on wind turbines differently.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Methodik und Hypothesen	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Hintergrund des Klimawandels	5
2.1 Der Klimawandel und seine Folgen	5
2.2 Prognostizierte Auswirkungen	7
2.3 Bisher nachzuweisende Auswirkungen	8
2.4 Maßnahmen zur Eindämmung und Prävention	9
3 Die Energiewende und nachhaltige Energiesysteme	11
3.1 Die Energiewende als Reaktion auf den Klimawandel	11
3.2 Internationale Abkommen und politische Maßnahmen im Zuge der Energiewende	13
3.3 Umsetzung der Energiewende durch nachhaltige Energiesysteme	16
3.3.1 Nachhaltige Energiesysteme	17
3.3.2 Zahlen und Fakten zur Nutzung nachhaltiger Energien	20
4 Seltene Erden	25
4.1 Definition seltener Erden	26
4.1.1 Besondere Eigenschaften	28
4.1.2 Vorkommen und Abbau	29
4.1.3 Umweltgefährdung durch den Abbau	31
4.2 Marktüberblick seltener Erden	33
4.2.1 China als Monopolinhaber	35
4.2.2 Preisentwicklung	36
4.2.3 Maßnahmen anderer Länder zur Minderung der Importabhängigkeit von China	37

4.3	End-of-Life-Betrachtung	39
4.3.1	Recycling	40
4.3.2	Nutzung von Substituten	42
4.4	Verwendung seltener Erden in der Windenergiebranche	44
4.4.1	Beeinflussung der Kosten von Windkraftanlagen	45
4.4.2	Umgang mit seltenen Erden in Unternehmen	46
5	Empirische Untersuchung	48
5.1	Darstellung der Methodik	48
5.2	Spezifische Durchführung und deren Analyse	50
5.3	Ergebnisse und Diskussion der qualitativen Untersuchung	52
5.3.1	Präsenz seltener Erden	54
5.3.2	Zusammenhang zwischen seltenen Erden und Windenergie	55
5.3.3	Deutung und persönliche Einschätzung der Befragten	59
5.3.4	Limitationen und weiterführende Fragen	62
6	Conclusio	64
6.1	Zusammenfassung	64
6.2	Fazit	66
7	Quellenverzeichnis	70
8	Anhänge	82

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung der Vorgänge des Klimawandels	7
2	Spektrum der Ziele für die Implementierung erneuerbarer Energien	14
3	Aufbau einer Windkraftanlage	18
4	Kumulative global installierte Windkraftkapazität 2001-2017	20
5	IRENA-Analyse zu den Anteilen an erneuerbaren Energien in 2015 sowie den Zielen für 2020 und 2030	22
6	Seltene Elemente im Periodensystem	29
7	Spektrum der Verwendung seltener Erden	34
8	Recyclingprozess seltener Erden	41

Tabellenverzeichnis

1	Aktive und potenzielle Abbauorte seltener Erden	31
2	Zusammenfassung der Schadstoffe beim Abbau und der Verarbeitung seltener Erden . .	32
3	Komprimierte Darstellung der Ergebnisse	53

Abkürzungsverzeichnis

APS	American Physical Society
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BWE	Bundesverband WindEnergie
CMI	Critical Materials Institute
CO₂	Kohlenstoffdioxid
ECEs	Energy Critical Elements
ECF	European Climate Foundation
EERE	Energy Efficiency and Renewable Energy
ERECON	European Rare Earths Competency Network
EHS	Emissionshandelssystem
EUREC	European Renewable Energy Council
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
FKW	Fluorkohlenwasserstoff
GE	General Electrics
GWEC	Global Wind Energy Council
H-FCKW	Teilfluorierter Kohlenwasserstoff
IEA	International Energy Agency
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
LCA	Life Cycle Assessment
Min.	Minuten
MRS	Materials Research Society
SF₆	Schwefelhexafluorid
UN	United Nations
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USD	United States Dollar
VOC	Volatile Organic Compound
WEC	World Energy Convention
WTO	World Trade Organization

1 Einleitung

Im Laufe der letzten Jahrzehnte rückte ein globales, allumfassendes Problem immer mehr in den Fokus: der Klimawandel. Die Erwärmung des Klimas um mehrere Grad Celsius innerhalb der nächsten 100 Jahre scheint unausweichlich. Die globale Erwärmung der Erde ist den Menschen zuzuschreiben, die seit der Industrialisierung große Mengen an Kohlenstoffdioxid (CO₂) und anderen Treibhausgasen in die Atmosphäre abgeben und bringt viele negative Folgen mit sich. Da die größten Mengen an Treibhausgasen in Prozessen der Energiegewinnung erzeugt werden, liegt hier das größte Potenzial der CO₂-Einsparung. Als Energiewende bezeichnet wird die Ablösung konventioneller durch emissionsneutrale Energiesysteme, wodurch dieses Ziel erreicht werden soll. Es geht hierbei um die effizientere und nachhaltigere Verwendung der verfügbaren Ressourcen auf der Erde. Die Windenergie, als eines dieser nachhaltigen Energiesysteme, ist weltweit führend in Bezug auf die gewonnene Menge an Elektrizität. Ihr kommt in der Energiewende eine besondere Bedeutung zu (UNFCCC, 1999, S. 1; Potsdam-Institut für Klimaforschung & Institut für Gesellschaftspolitik München, 2010, S. 93-94; Menges & Traub, 2012, S. 344; Voorhar & Myllyvirta, 2013, S. 5).

Windkraftanlagen sorgen für die Umwandlung der kinetischen Energie des Windes in elektrische Energie, die auf diese Weise für Industrie und Haushalte nutzbar gemacht wird. Die Windenergie ist das erfolgreichste Energiesystem, da es besonders nachhaltig ist und weltweit eingesetzt werden kann. Wie es bei den meisten Technologien der Fall ist, werden auch für die Herstellung von Windkraftanlagen spezielle Materialien benötigt. Während die meisten davon zu herkömmlichen und stabilen Marktpreisen zu erwerben sind, werden für die junge Technologie des Direktantriebs¹ Stoffe benötigt, deren Beschaffung nicht immer problemlos ist und in den letzten Jahren zu kritischen Einschätzungen aus Wissenschaft und Praxis geführt hat. Die sogenannten *seltene Erden* sind Metalle, die für die Generatoren der effizientesten Windkraftanlagen benötigt werden. Da es aufwendigen und die Umwelt belastenden Bergbaus bedarf, um diese Elemente zu gewinnen, werden sie nur an wenigen Orten abgebaut. Die Volksrepublik China besitzt seit vielen Jahren das Monopol der Gewinnung und Verarbeitung seltener Erden und bestimmt somit über Exportmengen und -preise (Nizhegorodtsev & Ratner, 2016, S. 197-198). Aktuellen Analysen zufolge gehen Forscher/innen davon aus, dass sich mögliche Lieferrisiken negativ auf die Entwicklung der Windenergie und somit auch der Energiewende auswirken könnten. Viele Hersteller von Windkraftanlagen haben bereits vor sieben Jahren starke Lieferrestriktionen seltener Erden erlebt und betrachten die Situation sehr kritisch. Aufgrund der Einbettung in Zeiten des Klimawandels und

¹ Siehe zu diesem Thema Abschnitt 4.4.

einer voranschreitenden Energiewende erfüllt die Windenergiebranche derzeit eine wichtige Aufgabe. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die Auswirkung der schwankenden Verfügbarkeit und Preise seltener Erden auf die Kosten von Windkraftanlagen zu untersuchen. Es wird in der Wissenschaft erst seit wenigen Jahren an dieser Thematik geforscht und der aktuelle Stand der Literatur soll wiedergegeben werden. Um eine hohe Relevanz der Ergebnisse zu erreichen, wird neben einer umfänglichen Literaturrecherche daher auch eine qualitative Untersuchung in Form von Experteninterviews durchgeführt. Durch die Befragung von Fachleuten aus Wissenschaft und Praxis soll die aktuelle Sichtweise zu der Verwendung seltener Erden in der Windenergiebranche fachübergreifend und aus verschiedenen Blickwinkeln analysiert werden (US Environmental Protection Agency, 2012, 6-1; Smith Stegen, 2014, S. 4; GWEC, 2018, S. 20).

Im Folgenden beschreibt Abschnitt 1.1 die Vorgehensweise sowie die Methodik der durchgeführten Untersuchung. Im inhaltlichen Zusammenhang werden an dieser Stelle auch die zugrunde liegenden Hypothesen vorgestellt. Anschließend wird Abschnitt 1.2 einen Überblick über den Aufbau der Arbeit geben und näher auf die Abfolge der Inhalte eingehen.

1.1 Methodik und Hypothesen

Für eine Einordnung der Forschungsfrage in den zugehörigen Kontext wird zunächst eine theoretische Auswertung der Fachliteratur vorgenommen. Ein Großteil der untersuchten Literatur wurde erst in den letzten fünf Jahren veröffentlicht und spiegelt dadurch die Aktualität des Themas wider. Es wurden neben spezifischen Artikeln aus Fachzeitschriften auch Berichte von nationalen und internationalen Regierungs- und Nicht-Regierungsorganisationen ausgewählt, um einen möglichst umfassenden Einblick in das untersuchte Feld zu geben.

Kern dieser Arbeit ist die empirische Untersuchung, die in Form von Experteninterviews durchgeführt wurde. Durch diese soll eine möglichst realitätsgetreue Abbildung der momentanen Sichtweisen der Wissenschaft und der Windkraftanlagenhersteller gewährleistet werden. Das gewählte Untersuchungsinstrument bringt viele Vorteile mit sich: Neben einer Direktansprache geeigneter Personen aus den beschriebenen Bereichen und des so zu gewinnenden Branchenwissens ist es ebenfalls möglich, Interviewpartner/innen vielfältig auszuwählen, um möglichst unterschiedliche Meinungen zu erfassen. Die Kontakte zu den befragten Personen wurden eigenständig hergestellt. Einige Personen wurden aufgrund ihrer Position und ihres Fachwissens kontaktiert und andere Personen wurden im Zuge des Besuchs zweier Fachmessen angesprochen. Die Befragung fand auf Grundlage eines Interviewleitfadens statt, der auf verschiedene Zusammenhänge zwischen seltenen Erden und Windkraftanlagen ausgerichtet ist. Letztendlich konnten Informationen und Meinungen von sieben Experten gewonnen werden, die in Kapitel

5 dieser Arbeit der Theorie und den Hypothesen gegenübergestellt werden. Die zugrunde liegenden Hypothesen lauten wie folgt:

1. Die in der Windenergie mit der Verwendung seltener Erden verbundene Problematik ist allen Akteuren gut bekannt und es werden Initiativen dagegen ergriffen.
2. Es gibt effiziente Substitute, die seltene Erden in Windturbinen ersetzen können.
3. Es gibt erfolgreiche Recyclingmethoden, die die Liefer- und Preissituation seltener Erden entspannen können.
4. Seltene Erden steigern die Effizienz und Leistung von Windturbinen erheblich.
5. Die Knappheit seltener Erden beeinflusst die Produktion und den Betrieb von Windkraftanlagen negativ und lässt diese deutlich teurer werden.
6. Windturbinenhersteller versuchen in Zukunft weniger auf seltene Erden zu setzen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sechs Kapitel gegliedert. Auf die Einleitung folgt eine theoretische Auswertung der Literatur. Diese erstreckt sich über Kapitel 2, Kapitel 3 und Kapitel 4 und befasst sich mit den Bereichen Klimawandel, Energiewende und seltene Erden. In Kapitel 2 wird aufgezeigt, welche Folgen der Klimawandel mit sich bringt und welche Schritte dagegen eingeleitet werden können.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Energiewende und inwiefern diese als Reaktion auf den Klimawandel zu betrachten ist. Um die Relevanz dieses Prozesses hervorzuheben, wird die Energiewende auch international beleuchtet und es werden Maßnahmen einiger Regierungen beschrieben, die das Ziel haben, die Energiewende voranzutreiben. Auch die erneuerbaren Energiesysteme als wichtigster Teil der Energiewende werden vorgestellt.

Anschließend folgt in Kapitel 4 eine Präsentation des derzeitigen Wissensstands über seltene Erden. Neben der Definition des Begriffes werden deren spezielle Eigenschaften vorgestellt, ein Überblick der Marktsituation gegeben und mögliche End-of-Life-Prozesse beschrieben. Außerdem wird der Zusammenhang zwischen seltenen Erden und Windkraftanlagen hergeleitet und analysiert.

In Kapitel 5 wird die durchgeführte Untersuchung sowie die zugrunde liegende Methodik dargelegt. Auf eine Erläuterung der Wahl der Methodik folgt eine Erklärung der Durchführung der Untersuchung sowie deren Analyse. Die Wahl des Untersuchungsinstruments fiel auf das Experteninterview. Daraufhin werden die Ergebnisse der Befragung nach Themenblöcken geordnet wiedergegeben, mit der Literatur verglichen und die zu Beginn aufgestellten Hypothesen geprüft.

Abschließend werden in Kapitel 6 die Resultate der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und interpretiert. An dieser Stelle erfolgt zudem die Beantwortung der Forschungsfrage durch die Literaturrecherche sowie die Untersuchung gewonnener Ergebnisse.

2 Hintergrund des Klimawandels

Mittlerweile ist der Klimawandel keine bloße Erscheinung mehr, sondern betrifft weltweit sowohl das Leben aller Menschen als auch die Industrie. Während Menschen als Negativfolgen des Klimawandels vor allem mit extremen Wetterereignissen wie z.B. Hitzewellen, Überschwemmungen, Waldbränden und Wirbelstürmen zu kämpfen haben, drohen Unternehmen neben den physischen Folgen des Klimawandels auch Risiken wie Rufverlust, Einfluss neuer gesetzlicher Regelungen und finanzielle Einbußen. In der Politik wird der Klimawandel weitestgehend als schwerwiegende Gefahr eingestuft und somit werden auf nationaler und globaler Ebene Maßnahmen dagegen ergriffen (Nhamo, 2016, S. 5-6).

Seit es auf der Erde Leben gibt ist das Weltklima vielen enormen Schwankungen unterlegen. Welche Ursachen zum Klimawandel führen und welche Folgen dies für das globale Klima hat, wird näher in Abschnitt 2.1 erläutert. Entsprechend erwarteter Negativauswirkungen des Klimawandels auf die Erde und die Menschheit wird besonders im Zusammenhang mit nachhaltigen Entwicklungsstrategien nach Abwendungsmöglichkeiten gesucht. Die prognostizierten und die bisher nachzuweisenden Folgen sowie Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels werden in den Abschnitten 2.2, 2.3 und 2.4 dargestellt (UNFCCC, 2016a, S. VI; Salawitch et al., 2017, S. 1).

2.1 Der Klimawandel und seine Folgen

Um den Klimawandel zu beschreiben und zu interpretieren, soll zunächst der Klimabegriff geklärt werden. Als Klima versteht man sowohl verschiedene Zustände als auch unterschiedliche Zusammensetzungen der Atmosphäre. Diese wiederum können durch Langzeitmessungen einer bestimmten Region oder eines exakten Standorts von sogenannten Klimaelementen beschrieben werden. Klimaelemente, die durch Beobachtung der atmosphärischen Aktivitäten erfasst werden können, umfassen Messwerte wie Druck, Feuchtigkeit und Temperatur der Luft, aber auch Niederschlag, Wind und die Erdbevölkerung (Schönwiese, 2008, S. 56).

Neben dem natürlichen Klimawandel über große Zeitspannen hinweg wird der Klimawandel² auch durch menschliches Eingreifen begünstigt. Entscheidend für die derzeitige Veränderungen des Klimas ist das Entweichen von Treibhausgasen in die Atmosphäre. Die starke Produktion von Treibhausgasen wird durch menschliche Aktivitäten, insbesondere die Energiegewinnung, verursacht. Weltweit werden

² Hiermit ist eine künstliche Veränderung des natürlichen Klimas gemeint.

zur Energiegewinnung vornehmlich fossile Brennstoffe eingesetzt, die Kohlenstoff enthalten. Werden die fossilen Brennstoffe zur Energiegewinnung verbrannt, verbindet sich der Kohlenstoff mit Sauerstoff und das so entstehende Kohlendioxid wird als Treibhausgas in die Atmosphäre abgegeben. Auch durch eine abweichende Nutzung der Böden, die durch die Abholzung von Wäldern und den Agrarbetrieb erfolgt, werden Treibhausgase wie Methan und Distickstoffoxid freigesetzt. In der Industrie werden ebenfalls Treibhausgase erzeugt. Durch bestimmte Prozesse werden chemische Stoffe wie halogenierte Kohlenwasserstoffe³ freigesetzt. Schließlich wirken sich auch die im Straßenverkehr und Transportwesen erzeugten Abgase durch die Produktion von bodennahem Ozon auf das Klima aus (UNFCCC, 1999, S. 1; Voorhar & Myllyvirta, 2013, S. 5; Greenpeace, 2018).

Die Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre wird das Klima der Forschung zufolge verändern. Durch sie entsteht eine für Infrarotstrahlen undurchlässige Schicht in der Atmosphäre. Die darin befindlichen Gase nehmen Infrarotstrahlung auf und behindern so den ursprünglichen Energiekreislauf im Klimasystem. Infolgedessen findet eine Anpassung des Klimas an die undurchlässigere Schicht statt, denn nur so kann die Balance zwischen Absorption von Sonnenstrahlen und Abgabe von Energie in den Kosmos erhalten werden. Hieraufhin nimmt die Temperatur auf der Erde zu. Dieser Temperaturanstieg wird in den folgenden Abschnitten 2.2, 2.3 und 2.4 näher behandelt (UNFCCC, 1999, S. 1).

Um einen umfassenderen Überblick zu geben, stellt Abbildung 1 das Klimasystem der Erde schematisch dar. Zu erkennen ist, dass die gesamte Umwelt Teil dieses komplexen Systems ist. Ändert sich die Atmosphäre, hat dies Einfluss auf das Zusammenspiel zwischen der Biosphäre, den Luftmassen und dem Poleis. Auch die Landoberfläche, die Böden und die Ozeane sind von dem Klimawandel in unterschiedlicher Weise betroffen. Durch die Landnutzung, eine veränderte Vegetation und dadurch resultierende Einflüsse auf das Ökosystem sind Böden Veränderungen unterworfen. Durch das Schmelzen der Pole sowie die Erwärmung des Wassers in den Ozeanen verschieben sich Strömungen, die Höhe des Meeresspiegels und biochemische Eigenschaften wie die Nährstoffdichte und der Salzgehalte, um nur einige der Veränderungen zu nennen (UNFCCC, 1999, S. 4-5; IPCC, 2007).

³ Zu diesen gehören u.a FCKW, H-FKW, FKW sowie weitere resistente Gase wie beispielsweise Schwefelhexafluorid (SF₆) (UNFCCC, 1999, S. 1).

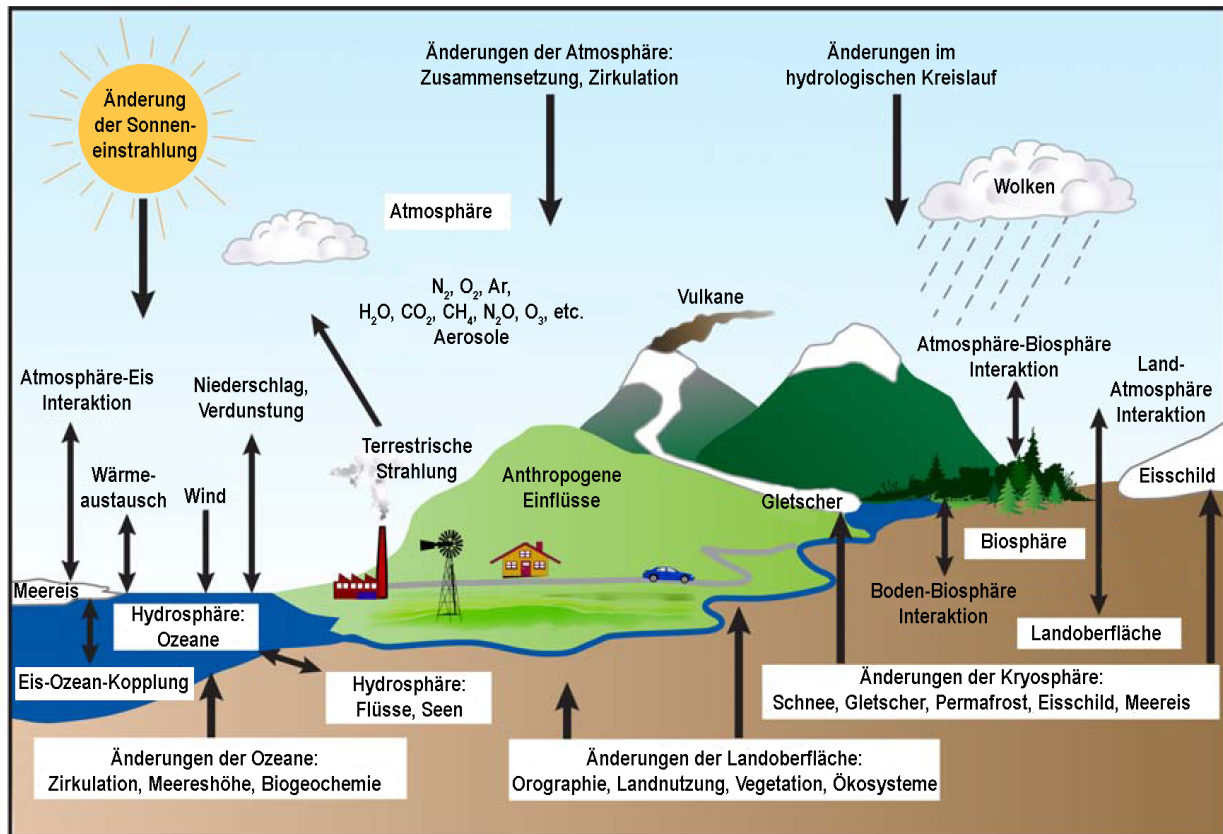


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgänge des Klimawandels (übersetzt gemäß IPCC, 2007)

2.2 Prognostizierte Auswirkungen

Es deuten mittlerweile diverse Forschungen darauf hin, dass ein menschenverursachter Klimawandel vorliegt. Um dies wissenschaftlich und in Zahlen darzulegen, werden gesammelte Daten zum Klima mathematisch aufbereitet. Dadurch entstehende Klimamodelle können den Aufbau und die Funktionsweise des Klimas beschreiben und deuten. Dabei werden verschiedene Abläufe simuliert, beispielsweise unterschiedlich hohe Annahmen von Treibhausgasen in der Atmosphäre oder auch Naturkatastrophen (Schmidt et al., 2017, S. 8).

Voraussagen für die zukünftige Klimaentwicklung konzentrieren sich auf die Messung der mittleren globalen Oberflächentemperatur, welche über Land voraussichtlich stärker ansteigen wird als über den Meeren. Bis Ende des 21. Jahrhunderts wird ein Temperaturanstieg von 1,7-4,4 Grad Celsius erwartet. Kein natürlicher Klimawandel der letzten 10.000 Jahre war so einschneidend. Der Meeresspiegel wird bis dahin der Prognose nach um 0,4-0,63 Meter ansteigen. Die Ursachen dafür liegen in der Ausdehnung des wärmeren Wassers, dem Schmelzen von Gletschern sowie des grönländischen und antarkti-

schen Inlandeises. Trotz wissenschaftlicher Einschätzungen und einem hohen Maß an Forschung auf diesem Gebiet bleiben viele Details sowie die tatsächlichen Folgen des Klimawandels unvorhersehbar. Grundsätzlich gehen Forscher jedoch davon aus, dass das Klima bereits Reaktionen auf die bis dato freigegebenen Treibhausgase gezeigt hat und der Klimawandel nachweisbar stattfindet (UNFCCC, 1999, S. 1; Schmidt et al., 2017, S. 13-14).

Mit dem Klimawandel sind große Repressionen verbunden. Darunter fällt der starke Rückgang von Reserven an Trinkwasser, verursacht durch veränderte Niederschlagsmengen und Verdunstung. Aber auch der Anstieg des Meeresspiegels sowie abnorme Wettererscheinungen werden Wohngebiete und die allgemeine Infrastruktur gefährden. Es ist davon auszugehen, dass vor allem die Armen und Schwachen der Gesellschaft darunter leiden werden. Das Ökosystem und die Bevölkerung werden gezwungen sein, ihr Leben mit dem neuen Klima in Einklang zu bringen (UNFCCC, 1999, S. 1-2).

Große Städte sind dem Klimawandel besonders ausgesetzt, da die Durchschnittstemperaturen im Stadtinneren höher liegen als in Randbezirken oder im ländlichen Raum. Es wird angenommen, dass die maximale Tagestemperatur in deutschen Großstädten bis 2050 an etwa 45 Prozent mehr Tagen höher liegen wird als 25 Grad Celsius und es wird mehr Tage geben, an denen die Höchsttemperatur 30 Grad Celsius übersteigt. Eine weitere Gefahr ergibt sich durch die Drohung von Hochwasser in dicht bebauten Gebieten. Diese wird vor allem durch veränderte Wetterphänomene wie Starkregen verursacht. Auch gesundheitliche Folgen der Stadterwärmung sind zu erwarten und werden sich durch mehr Asthmafälle, höhere Allergieraten und das häufigere Versagen von Lungen- und Herzkreislaufsystem, besonders bei älteren und chronisch kranken Menschen, äußern (Hoffmann, 2012, S. 7).

Auch auf die Wirtschaft wird sich der Klimawandel auswirken. Bisher trug der stetig ansteigende Verbrauch fossiler Brennstoffe maßgeblich zur Steigerung der weltweiten Lebensqualität vieler Menschen bei. Der Verbrauch jener Ressourcen ist jedoch gleichzeitig einer der Hauptverursacher von Treibhausgasen. Der Klimawandel bedroht durch einen Temperaturanstieg und Umweltkatastrophen nicht nur die Weltbevölkerung, sondern ebenso die Wirtschaft und ihre Investitionen, die er dabei mitunter zerstört (Rezai et al., 2018, S. 164).

2.3 Bisher nachzuweisende Auswirkungen

Aufgrund bisheriger Beobachtungen und Messungen können trotz großer Schwankungen in der Atmosphäre bereits negative Auswirkungen des Klimawandels fokussiert werden. Doch auch durch direkten Eingriff der Menschen sind bereits Veränderungen sichtbar. Dazu zählen u.a. die Folgen von Flussbegradigungen, die Überschwemmungen zur Folge haben, sowie eine nicht nachhaltige Landnutzung, die zur Degradation von Böden führt (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, 2008, S. 59).

Die Menschheit ist bisher durch direkte und indirekte Einflüsse des Klimawandels betroffen. Durch die Auswertung von Forschungsergebnissen lassen sich Folgen wie Dürreprobleme, Gletscherschmelze, stark zunehmende Trockenheit, Wirbelstürme und Hitzewellen sowie eine erhöhte Menge an Niederschlägen durch stärkere Verdunstung⁴ gesichert nachweisen. Ein globaler Trend ist zu beobachten: Feuchte Gebiete wie die Tropen werden noch feuchter und trockene Gebiete wie die Wüste Sahara noch trockener. Vor allem Extremereignisse wie tropische Wirbelstürme werden sich häufen und besonders die Karibik und China durch Zerstörung bedrohen. Der Meeresspiegelanstieg droht, Landflächen, die auf niedrigem Niveau liegen, zu überfluten. Da die Menschen dem Klima ausgeliefert sind, wird es darüber hinaus in absehbarer Zeit zu Bevölkerungswanderungen kommen (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, 2008, S. 59-65; Pardo Martínez et al., 2018, S. 314).

Flora und Fauna stehen als Grundbestandteile des globalen Ökosystems auch unter dem Einfluss des Klimawandels. In zahlreichen Langzeitstudien ließen sich Folgen für knapp 1.500 Arten nachweisen, wovon bei 81 Prozent Veränderungen des Verhaltens festgestellt werden konnten. Besonders im Frühling wirken sich diese Veränderungen aus, da dessen Jahreseintritt tendenziell früher beginnt und somit Vögel eher Eier legen, Pflanzen früher blühen und Säugetiere, die Winterschlaf halten, eher erwachen. Aufgrund der globalen Erwärmung kommt es dazu, dass Tiere und Pflanzen aus äquatornäheren Gebieten weiter Richtung Pole vordringen und sich dort ansiedeln, während diejenigen Arten, für die kalte Lebensräume wichtig sind, räumlich eingeschränkt werden (Irsch, 2003, S. 82; Parmesan & Yohe, 2003, S. 37-42).

2.4 Maßnahmen zur Eindämmung und Prävention

Um den Klimawandel zu bekämpfen und dabei als Hauptursache den Treibhausgasanteil in der Atmosphäre konstant zu halten, bemüht sich die Gesellschaft um eine Gegenentwicklung. Dazu werden elementare Veränderungen in bestimmten Bereichen der Wirtschaft und Industrie initiiert. Klimakonventionen stellen eine globale und politische Reaktion auf den Klimawandel dar. Die erste Version entstand 1992 mit dem Ziel, Treibhausgasemission auf einem stabilen Level zu halten. Im Jahr 1997 folgte das Kyoto-Protokoll mit Plänen für die Zeit nach 2000 und dem Zusatz einer umweltfreundlichen Entwicklung. Das Pariser Klimaabkommen folgte in 2015. Hierin ist festgehalten, dass das Klima durch menschliche Aktivitäten, die auf die Erde und ihr Klima einwirken, im Vergleich zum vorindustriellen Klima nicht mehr als zwei Grad Celsius ansteigen soll⁵. Für dieses Ziel wird eine starke Einschränkung

⁴ Pro Grad Erwärmung nimmt diese um etwa ein bis zwei Prozent zu.

⁵ Der beschriebene Zeitabschnitt meint hier den Beginn der Industrialisierung, besonders die Erfindung der Dampfmaschine. Damit ist der Anfangspunkt der verstärkten Abgabe von Treibhausgasen in die Atmosphäre gemeint.

der Abgabe von Treibhausgasen angestrebt. Der Klimavertrag wurde von 195 Ländern verhandelt, die aufgrund ihrer jeweiligen individuellen Energiebeschaffung unterschiedliche Interessen daran haben⁶. Als Resultat wird bis 2100 jedoch immer noch eine Temperaturerhöhung von drei Grad Celsius erwartet (UNFCCC, 1999, S. 2; Weimann, 2016, S. 3; Salawitch et al., 2017, S. 7).

Wie bereits beschrieben ist die Reduktion der von Menschen verursachten Treibhausgasen Hauptbestandteil des Klimaschutzes. Dieses Ziel kann vornehmlich durch die Implementierung grüner Energien und eines geringeren Verbrauchs an Energie erreicht werden. Zudem können Treibhausgasen wie Grünflächen, Moore und neu entwickelte Technologien einen Auslass der Treibhausgase aus der Luft erzeugen (Heimann, 2017, S. 84).

Neben der Eindämmung von Treibhausgasen findet vielerorts auch eine Anpassung an das Klima statt. Menschen finden Möglichkeiten, mit den Folgen des Klimawandels zu leben. Dabei geht es beispielsweise um

- den Schutz und vollständigen Erhalt von Landflächen an Küsten;
- die Integration, bei der Menschen Landflächen nutzen, obwohl diese regelmäßig überschwemmt werden und
- den Rückzug, in dessen Folge Menschen sich zurückziehen und überschwemmte Landflächen aufgeben.

Zum Schutz vor Hitze können Gebäude optimiert sowie Flächen rückgebaut oder effizienter gestaltet werden. Gegen Stürme können Gebäude verstärkt und Zufluchten errichtet werden. Im urbanen Raum können in der Stadtplanung mehr Grünflächen geschaffen werden, um Belüftung an den zunehmenden heißen Tagen im Jahr zu gewährleisten. Dazu gehören beispielsweise isolierende Baumaterialien, helle Gebäude und kleinere Fenster. Der Kampf gegen den Klimawandel betrifft letztendlich alle Teile der Gesellschaft, da hier die Implementierung einer effizienteren und grüneren Energienutzung nötig ist. Dazu zählen Industrie, Haushalte, Büros, Verkehr und Landwirtschaft. Diese Gesellschaftsgruppen können u.a. durch neue Richtlinien für Konsumenten und Unternehmer, die Einführung von Grenzwerten, den Handel mit Emissionen, Aufklärung, neue grüne Technologien, den Ausbau öffentlicher Verkehrsnetze und das Umstellen der gesellschaftlichen Gewohnheiten zur Verringerung des Energieverbrauchs bewegt werden (UNFCCC, 1999, S. 2; Heimann, 2017, S. 93-100; Hoffmann, 2012, S. 7).

⁶ Die Durchschnittstemperaturerhöhung global bei weniger als zwei Grad Celsius und bestmöglich sogar bei nur 1,5 Grad Celsius zu halten ist im Pariser Klimaabkommen in Artikel 2) 2. a festgelegt. Die Eindämmung der Treibhausgasemissionen wird in Artikel 2) 2. b, c beschrieben; in Artikel 4) 1. wird postuliert, dass dies so schnell wie möglich passieren soll und Artikel 7 besagt, dass es ein gemeinschaftliches Ziel ist, an dem auf allen Ebenen (regional, national, international, global) mitgewirkt werden muss (UNFCCC, 2016b, S. 4-9).

3 Die Energiewende und nachhaltige Energiesysteme

Wie in Kapitel 2 erläutert besteht derzeit in der Wissenschaft wie in der Politik und der Gesellschaft Einigkeit darüber, dass der Klimawandel real ist und noch in diesem Jahrhundert Veränderungen auf der Erde mit sich bringen wird. Eine Reaktion darauf sowie Maßnahmen zur Abmilderung der Folgen des Klimawandels gab es weltweit. Der Begriff *Energiewende* setzte sich als Gegenbewegung zur globalen Erwärmung besonders in Deutschland durch und ist bereits seit vielen Jahren politisches Thema. Grundsätzlich ist Deutschland momentan einer der Vorreiter hinsichtlich der Kehrtwende zur nachhaltigen Energieerzeugung. Das ambitionierte Ziel des Staates sieht eine zu 100 Prozent aus erneuerbaren Energien bestehende Energieerzeugung vor. Erreicht werden kann dieses Ziel zum einen durch ein prozentuales Wachstum erneuerbarer Energien, auf das im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird, und zum anderen durch die Effizienzsteigerung einer solchen Energiegewinnung (Bührke & Wengenmayr, 2011, S. I).

Auch auf globaler Ebene streben Organisationen wie die Vereinten Nationen Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels an. In der *2030 Agenda for Sustainable Development* wird der Schutz der Erde schon an zweiter Stelle genannt: Produktion und Konsum sollen nachhaltiger und den klimatischen Veränderungen soll entgegengewirkt werden. Außerdem fordern die Vereinten Nationen einen essentiellen Anstieg in der erneuerbaren Energieerzeugung sowie eine Effizienzverdopplung dieser Energieressourcen (UN, 2015).

Im Folgenden wird in Abschnitt 3.1 die Funktion der Energiewende als Reaktion auf den Klimawandel erläutert. Anschließend werden in Abschnitt 3.2 einige deutsche und internationale konkrete politische Maßnahmen mit dem Ziel der Energiewende beschrieben und Abschnitt 3.3 geht näher auf die technische Umsetzung der Energiewende ein.

3.1 Die Energiewende als Reaktion auf den Klimawandel

Um zunächst die richtigen Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels zu finden, werden adäquate Strategien und Klimaschutzziele erforscht und in der Anwendung beobachtet. Dazu gehören einerseits Anpassungsmaßnahmen, die nur teilweise zu realisieren sind, und andererseits die von Reduktion umweltschädlichen Emissionen wie Treibhausgasen. Da etwa zwei Drittel aller von Menschen

in die Atmosphäre abgegebener Treibhausgase aus dem Energiesektor kommen, ist offensichtlich, dass hier das größte Vermeidungspotenzial und somit auch der größte Handlungsbedarf besteht. Dieses Potenzial kann durch die Umstrukturierung des Energiesystems ausgeschöpft werden. Das in Abschnitt 2.4 erwähnte angestrebte Ziel einer Erwärmung um zwei Grad Celsius ist ein Kompromiss, unter dem Klimaschäden bereits in Kauf genommen werden. Den Menschen stehen große technische und gesellschaftliche Herausforderungen bevor, um dieses Ziel zu erreichen (Potsdam-Institut für Klimaforschung & Institut für Gesellschaftspolitik München, 2010, S. 93-94).

Auch auf den jährlich stattfindenden Weltklimakonferenzen werden diese Themen diskutiert. Für eine globale Emissionsreduktion kommen vor allem wirtschaftliche und technologische Instrumente zum Einsatz, doch auch die Arrangements für ein grenzüberschreitendes, internationales Handeln sind von großer Bedeutung. Aus wirtschaftlicher Sicht helfen Marktmechanismen und ein festgelegter Treibhausgaspreis am besten, um die gesetzten Emissionsziele am effizientesten zu erreichen. Ein gerechtes Vorgehen bedarf eines internationalen Diskurses der Staaten untereinander. Märkte und Unternehmen werden reagieren, wenn öffentliches Handeln und Wirtschaftspolitik entsprechende Zeichen setzen und die Emissionsreduktion belohnen. Mit der Absicht, den Ehrgeiz zu erhöhen, wurde auf der Klimakonferenz 2017⁷ in Bonn eine Bilanzierung der erreichten Treibhausgasreduktion aller Mitgliedstaaten in 2018 und 2019 vereinbart. Außerdem soll jährlich insgesamt ein Betrag von 100 Milliarden USD in den Klimaschutz fließen. Auch zum Ausstieg aus der durch Kohle erzeugten Energie in den nächsten zehn Jahren haben sich einige große Länder wie Großbritannien, Frankreich und Mexiko bekannt (Stern, 2009, S. 125; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2017).

Mit Blick auf Deutschland, wo die Energiewende maßgeblich definiert wurde, zeigt sich außerdem, dass es sich dabei nicht allein um die direkte Reduktion der Treibhausgase und somit die Bekämpfung des Klimawandels handelt. Der Staat visiert einen baldigen Ausstieg aus der Atomkraft, die Verringerung der Abhängigkeit von Gas und Öl aus anderen Ländern, das Wirtschaftswachstum und die Entstehung von Arbeitsplätzen durch neue Technologien und die Motivation von Nachahmern an. Eine Umfrage des *ifo Schnelldienstes*⁸ zeigt, dass mehr als 80 Prozent der Befragten aus Wirtschaft, Verbänden und Politik davon überzeugt sind, dass die Energiewende und insbesondere das Ziel, bis 2050 eine zu 80 Prozent aus erneuerbaren Energien gespeiste Stromversorgung in Deutschland zu erreichen, richtig ist (Joas et al., 2014, S. 6-7).

⁷ Das Ziel der letztjährigen Klimakonferenz war es, die Umsetzung des Pariser Klimaabkommens voranzubringen, um die Erderwärmung deutlich unter zwei Grad Celsius zu halten (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2017).

⁸ Der *ifo Schnelldienst* ist eine über aktuelle Politikthemen und ifo-Forschungsergebnisse berichtende Zeitschrift, die zweimal im Monat erscheint (ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V., 2018).

In einer Studie aus den Neunzigerjahren, die in Zusammenarbeit mit dem *World Energy Council*⁹ und dem *International Institute for Applied Systems Analysis*¹⁰ entstand, modellierten Wissenschaftler bereits konkrete Abläufe der zukünftigen Energieversorgung. Im Rahmen dieser werden drei Szenarien der Energieumwelt unter Entwicklung dargestellt. Hauptaugenmerk liegt dabei auf den prägendsten Einflüssen des Bevölkerungswachstums, der ökonomischen Entwicklung, der steigenden Qualität und Umweltkompatibilität finaler Energiequellen und der Verfügbarkeit von sowie dem Vertrauen in fossile Brennstoffe in den nächsten Jahrzehnten. Schätzungen besagen, dass die Reserven an fossilen Brennstoffen wie Gas, Öl und Kohle die globale Energieversorgung noch für viele Jahre sicherstellen könnten. Da es sich hier auch um einen wirtschaftlich bedeutenden Sektor handelt, ist kaum anzunehmen, dass die fossile Energieerzeugung in naher Zukunft enden wird. Die Bewegung hin zu saubereren, flexibleren und geeigneteren Energiequellen ist sichtbar, doch die Frage ist, wie schnell sie sich fortentwickeln kann. Strenge internationale Umweltvorschriften, z.B. zur Limitierung des CO₂-Ausstoßes, unterstützen diese Bewegung hin zu erneuerbaren Energien. Einige dieser Vorschriften werden im folgenden Abschnitt näher vorgestellt (Grübler et al., 1996, S. 237-238, 260-262).

3.2 Internationale Abkommen und politische Maßnahmen im Zuge der Energiewende

Bereits seit den Siebzigerjahren gibt es internationale Klimaschutzbemühungen, dennoch hat die Implementierung effektiver Abkommen auf nationaler Ebene lange Zeit in Anspruch genommen. Einhelliges Ziel darin ist die Reduktion von Emissionen und der damit in Verbindung stehende Umbau der Energieerzeugung von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energien. Besonders betroffen ist der Stromsektor, der dementsprechend auch von den meisten Gesetzgebungen anvisiert wurde (Hook, 2018, S. 30).

Um die Vorteile erneuerbarer Energien zu nutzen und zu fördern, haben Staaten weltweit teils unterschiedliche Konzepte eingeführt. Ende 2015 hatten bereits 173 Staaten Ziele zur Einführung und Unterstützung von erneuerbaren Energien festgesetzt. Diese Ziele werden in verschiedenen Formen in die Gesetzgebung eingebunden. Zum einen werden sie als Regierungserklärungen abgegeben, zum anderen werden sie äußerst detailliert und gesetzlich verpflichtend mit spezifischen Angaben und exakten Werten quantifiziert. In Südafrika beispielsweise werden diese Ziele in Sachpläne eingebettet, in Chi-

⁹ Der *World Energy Council* (WEC), der Weltenergierat, wurde 1923 als von den UN akkreditierter, globaler Energierat gegründet und verfügt über eine Präsenz in über 90 Ländern. Zu seinen Mitgliedern zählen private und staatliche Unternehmen, wissenschaftliche Institutionen, Nichtregierungsorganisationen sowie andere energiebezogene Akteure. Der WEC setzt sich für die Umsetzung eines machbaren, stabilen und umweltfreundlichen Energiesystems zum Nutzen aller ein (WEC, 2018).

¹⁰ Das *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) ist ein internationales wissenschaftliches Institut, das kritisch im Bereich der großen Veränderungen des 21. Jahrhunderts forscht und zwar in Bezug auf die Umwelt, Wirtschaft, Technologie sowie das soziale Umfeld (IIASA, 2018).

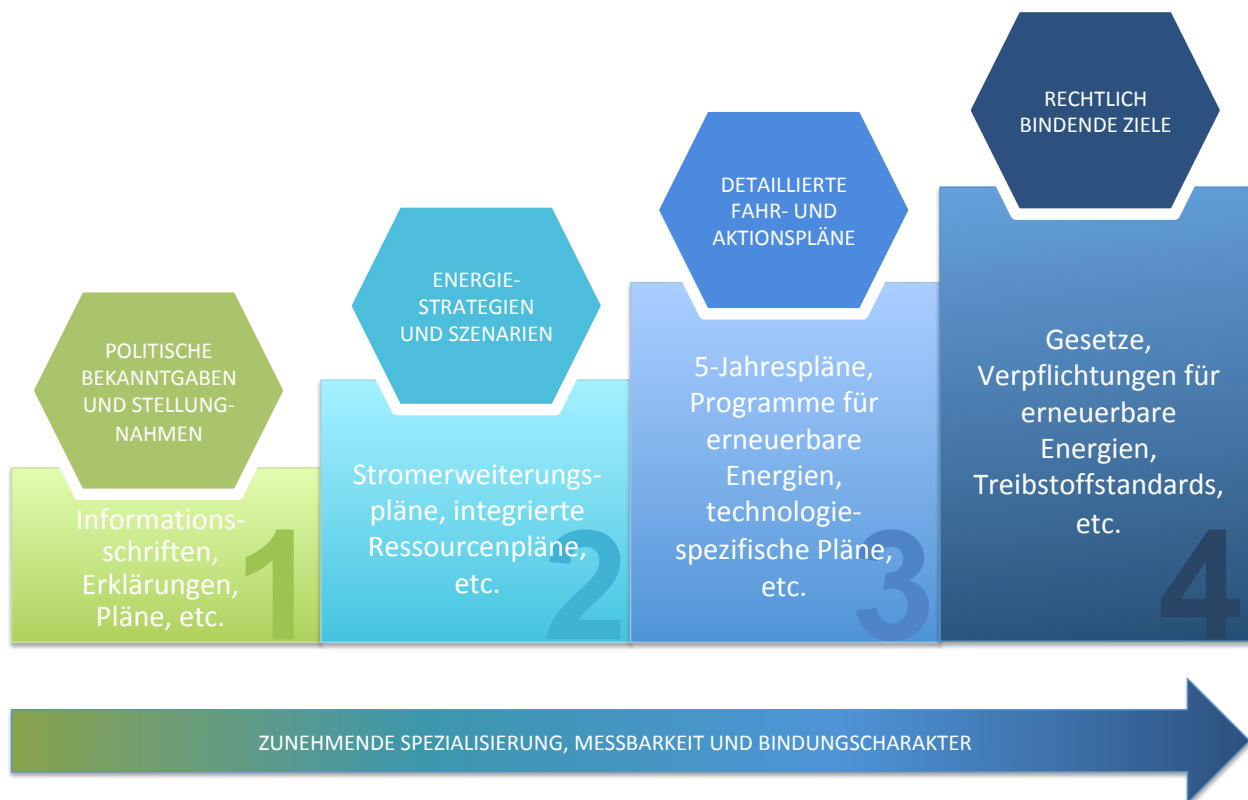


Abbildung 2: Spektrum der Ziele für die Implementierung erneuerbarer Energien (in Anlehnung an IRENA, 2017, S. 29)

na und Indien dagegen gibt es nationale Entwicklungspläne. In den USA, der EU und Chile werden sie rechtlich bindend mit klar definierten Einhaltungsrichtlinien durchgesetzt. Im Zuge des Pariser Klimaabkommens haben 74 Staaten bestimmte Ziele für die Implementierung erneuerbarer Energien in ihren vereinbarten, national zu leistenden Beitrag aufgenommen. Generell werden die meisten Länder in den letzten Jahren ambitionierter und erhöhen ihre Ziele besonders im Bereich der Stromerzeugung. In Abbildung 2 ist zu sehen, welcher Ebene sich die jeweiligen Zielvorgaben zuordnen lassen. Auf der ersten Implementierungsebene befinden sich zunächst politische Zugeständnisse und Stellungnahmen, auf Ebene zwei werden die Ziele bereits schriftlich zusammengefasst und beispielsweise in Planform festgehalten, auf Ebene drei werden detaillierte Fahr- und Aktionspläne erstellt und auf der vierten und letzten Ebene werden die Ziele für erneuerbare Energien in die jeweilige nationale Gesetzgebung übernommen, z.B. in Form von Treibstoffstandards (IRENA, 2017, S. 28-29).

Die Europäische Union startete 2000 das *Europäische Programm für den Klimaschutz*, das bereits 2002 von allen EU-Mitgliedern unterzeichnet wurde. 2007 entstand daraus das *Klima- und Energiepaket*, das in der ersten Fassung folgende Ziele beinhaltete:

- verglichen mit 1990 die Treibhausgasemissionen um mindestens 20 Prozent vermindern;
- den Anteil der erneuerbaren Energien am Energieverbrauch auf 20 Prozent anheben;
- die Effizienz der Energieerzeugung in der Art steigern, dass der Primärenergieverbrauch noch unter 20 Prozent der prognostizierten Angaben liegt.

2014 passte die EU diese Ziele auf Erreichung im Jahr 2030 wie folgt an:

- verglichen mit 1990 die Treibhausgasemissionen um mindestens 40 Prozent vermindern;
- den Anteil der erneuerbaren Energien am Energieverbrauch auf 27 Prozent anheben;
- die Effizienz der Energieerzeugung um mindestens 27 Prozent steigern (Hook, 2018, S. 30).

Bis 2050 sollen die Treibhausgasemissionen in der EU gegenüber dem Wert in 1990 um 80-95 Prozent gesenkt werden. Das *EU-Emissionshandelssystem*¹¹ ist neben der Umsetzung dieser Ziele für eine flexible Einbettung des Kyoto-Protokoll-Mechanismus in der EU und den Mitgliedsstaaten zuständig. Es bezieht zudem die Akteure der besonders energieintensiven Industrie mit ein. Dazu gehören die Stromerzeugung, die Zement- und Stahlproduktion genauso wie die innereuropäische Luftfahrt. Die betroffenen Unternehmen müssen ihre CO₂-Emissionen jährlich senken. Die *Energieeffizienzrichtlinie*¹² von 2012 verpflichtet außerdem dazu, die Energieeffizienz in den Bereichen Erzeugung, Versorgung und Verbrauch zu steigern. Neben weiteren Effizienzrichtlinien gibt es zudem zahlreiche Forschungsförderungen, die im Bereich innovativer Technologien und im Sektor der erneuerbaren Energien vergeben werden (EU, 2018b; Hook, 2018, S. 30-31).

In Deutschland wurde bereits 1991 das *Stromeinsparungsgesetz* erlassen, in dem die Einspeisung erneuerbarer Energien in das Stromnetz geregelt und ein Anreiz zur Produktion erneuerbarer Energie gegeben wurde. Das wichtigste Gesetz ist jedoch das *Erneuerbare-Energien-Gesetz*, welches das alte Stromeinsparungsgesetz ablöste. Hauptziel ist es, mit diesem Gesetz Klima und Umwelt zu schützen, indem erneuerbare Energien gezielt gefördert werden und ihr Anteil deutlich ausgebaut wird. Zu den erneuerbaren Energien zählen Windkraft, Photovoltaik, Wasserkraft, Biomasse und Geothermie. Seit 1991 nahm der Anteil erneuerbarer Energien deutlich zu. Während dieser Anteil 1991 noch bei 3,2 Prozent lag, betrug er im Jahr 2015 bereits 30 Prozent des Gesamtstromverbrauchs. 2025 soll er 40-45 Prozent betragen und für 2035 werden 55-60 Prozent angestrebt. Dazu kommt, dass Deutschland beabsichtigt,

¹¹ Das *EU-Emissionshandelssystem* (EU-EHS) ist ein Instrument der EU, um den Klimawandel zu bekämpfen. In diesem Handelssystem mit festen Obergrenzen, die regelmäßig gesenkt werden, wird auf einer Marktplattform Kohlenstoff gehandelt. Im Rahmen der Obergrenzen können Emissionszertifikate erworben werden, mit denen gehandelt werden kann. Ziel des Systems ist es, die erzeugten Treibhausgasemissionen zu senken (Europäische Kommission, 2018).

¹² Die *Energieeffizienzrichtlinie* wurde 2012 festgelegt und 2016 mit dem Ziel erneuert, einen Katalog verpflichtender Maßnahmen zu implementieren, die der EU dabei helfen sollen, das Energieeffizienzziel von 20 Prozent bis 2020 zu erreichen (EU, 2018a).

im Jahr 2022 aus der Kernkraft und bis Ende 2018 aus der Steinkohleförderung auszusteigen. Diese Zahlen beziehen sich allein auf die Stromproduktion und noch nicht auf die gesamte Energiewende, die auch Heizung, Warmwasser und Wärme für Industrieprozesse sowie Transport, insbesondere den Straßenverkehr, umfasst (Kühne & Weber, 2018, 4-6).

3.3 Umsetzung der Energiewende durch nachhaltige Energiesysteme

Die vorangegangenen Betrachtungen aus den Abschnitten 3.1 und 3.2 machen deutlich, dass der Einsatz und Ausbau erneuerbarer Energien ein wichtiger Schritt ist, um das Klima zu schützen und die Energiewende voranzubringen. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf den Systemen und deren Technologien, die es multidimensional in alle Prozesse der globalen Energieversorgung einzubauen gilt. Dazu sind eine koordinierte Bereitstellung und eine horizontalere Ausrichtung der Energieversorgung unter Berücksichtigung diverser geografischer und sozialer Gegebenheiten erforderlich. Für öffentliche oder private Energieversorger eignen sich andere Technologien als für private Haushalte, die Gemeinschaft oder die Industrie (Walker & Cass, 2007, S. 458, 462).

Bisher existieren verschiedene Arten von Technologien, die als erneuerbare oder saubere Energien bezeichnet werden. Im aktiven Betrieb haben sie, im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen, keine oder so gut wie keine Luftverschmutzung, Wasserverschmutzung oder negative Einflüsse auf das Klima zur Folge. Diese Energien sind nicht nur *sauber*, sondern aus praktischer Sicht auch nahezu unendlich vorhanden, da sie zum Beispiel durch Sonne oder Wind erzeugt werden. Diverse Studien haben ergeben, dass sich der gesamte Stromverbrauch aus rein technischer, geografischer und wirtschaftlicher Sicht durch erneuerbare Energien gewinnen lassen könnte. Durch eine entsprechend ausgerichtete, zum Teil grenzüberschreitende Vernetzung und Versorgung durch Strom aus erneuerbaren Energien könnten auch etwaige Versorgungsengpässe aufgrund von Wetter- oder jahreszeitlichen Schwankungen ausgeglichen werden. Zu den erneuerbaren Energien gehören hauptsächlich jene, die durch Wasser, Wind oder Sonnenlicht- und -wärme erzeugt werden. Dazu zählen die Windenergie, bei der Rotorblätter in Windkraftanlagen durch Windanströmung über einen Generator Strom erzeugen, Wellenenergie, bei der Energie durch Wellenfluss an der Meeresoberfläche umgewandelt wird, Geothermie, bei der die Wärme des Erdinneren genutzt wird, Hydroenergie, bei der durch den Fall von Wassermassen in Staudämmen Strom erzeugt wird, Gezeitenkraftwerke, die sich die Kraft der natürlichen Gezeiten Ebbe und Flut zu Nutzen machen, Solarzellen, die Sonnenlicht in Strom umwandeln können, sowie konzentrierte Solarenergie, bei der die Wärme der Sonneneinstrahlung in Hitze und dann in Strom umgewandelt wird (Jacobson & Deluchi, 2011, 1154-1158).

Auch wenn die Kosten, gerade für Wind- und Sonnenenergie, stetig sinken und eine Ausbreitung nahe liegt, kann der weitere Ausbau dieser Energiequellen nicht ohne eine weiterentwickelte Form der Stromgenerierung und -verteilung gewährleistet werden. Es werden erweiterte Speichermöglichkeiten sowie der Stromnetzausbau zur Implementierung erneuerbarer Energien benötigt, da so die Effizienz der Übertragung und Verteilung gesteigert werden kann. In diesem Bereich gilt es, die Technologie auszubauen und weiterzuentwickeln, aber auch auf kommerzieller und gesetzlicher Ebene eine förderliche Grundlage zu schaffen. Durch eine erfolgreiche Umsetzung können effizientere Strommärkte, niedrigere Strompreise, eine größere Versorgungsverlässlichkeit und -sicherheit sowie eine stärkere Wirkung erneuerbarer Energien erreicht werden. Daneben bestehen u.a. die Optionen der Kraft-Wärme-Kopplung, des Recyclings und der Materialsubstitution, politische Maßnahmen zur vergünstigten Nutzung des Personennahverkehrs und Benzinsteuern sowie die Energieeinsparung an vielen Stellen. Innovationen, die zu einem schnellen Vollzug der Energiewende beitragen, fördern diese ebenso (Dincer, 2000, S. 166; Chu & Majumdar, 2012, S. 298, 302).

Im Folgenden wird in Unterabschnitt 3.3.1 die derzeit bedeutendste nachhaltige Energiequelle Windkraft beschrieben. In Unterabschnitt 3.3.2 werden Zahlen und Fakten zur Implementierung nachhaltiger Energiesysteme vorgestellt. Dazu gehören Werte aus Deutschland, den USA und weiteren Staaten.

3.3.1 Nachhaltige Energiesysteme

Weltweit sind Politik und Forschung mehrheitlich davon überzeugt, dass die erforderliche Reduktion von CO₂-Emissionen durch Technologie erreicht werden kann. Dazu wird vor allem eine Effizienzsteigerung der jetzigen Energiesysteme angestrebt, besonders da die erneuerbaren Energien einen immer größeren Anteil der weltweit produzierten Energie ausmachen. Zur Effizienzsteigerung gehören Verbesserungen elektrischer Speichermöglichkeiten, aber auch technische Leistungsverbesserungen der Systeme selbst. Darüber hinaus werden erneuerbare Energiesysteme immer günstiger und erhöhen den wirtschaftlichen Nutzen der Energieerzeugung (EUREC, 2009, S. 17; WEC, 2017a, S. 4; EUREC, 2018a, S. 3).

Die Implementierung erneuerbarer Energiesysteme nimmt weltweit zu, besonders stark vertreten sind hier solche Systeme, die auf Solar- oder Windenergie basieren. Die derzeitige Dominanz dieser Systeme wird auch durch Aktivitäten der *Association of European Renewable Energy Research Research Centres*¹³ widerspiegelt, die momentan im Bereich der Stromerzeugung fast ausschließlich Solar- und Windprojekte vorstellt und fördert. Auch die Forschungsprioritäten sind deutlich auf Solar- und Windenergie ausgerichtet und sollen in Zukunft weiter gefördert werden. Als eines der Resultate werden

¹³ Die *Association of European Renewable Energy Research Research Centres* (EUREC) wurde 1991 gegründet und repräsentiert europäische Forschungszentren und Universitätsabteilungen, die sich im Bereich der erneuerbaren Energien engagieren und forschen (EUREC, 2018b).

künftig Solarzellen erhältlich sein, die Strom noch günstiger produzieren können als herkömmliche Kraftwerke. Auch die Windenergie etabliert sich als zunehmend verlässliche und kostengünstige Quelle zur Stromgewinnung, besonders der Offshore-Bereich wird nach 2020 deutlich wachsen. Obwohl diese Energiequellen weltweit nahezu unendlich und umsonst verfügbar sind, gibt es Unzulänglichkeiten, denn sie sind nur abrufbar, sofern Sonnenlicht oder Wind vorhanden sind. Dies ist nicht zu jedem Zeitpunkt in ausreichendem Maße der Fall und kann gerade dann zu Lieferengpässen führen, wenn es in der Stromnachfrage zu Lastspitzen kommt. Nichtsdestotrotz gilt gerade der Wind als eine der relevantesten erneuerbaren Energiequellen. Im Folgenden werden die typischen Charakteristika, technischen Eigenschaften, Verbreitungen und Zukunftsaussichten der Windenergie vorgestellt, da diese auch den weiteren Betrachtungen und Nachforschungen dieser Arbeit zugrunde liegen (EUREC, 2009, S. 17; Vitale, 2016, S. 2-3; Dieckhoff & Leuschner, 2016, S. 7; WEC, 2017a, S. 4; EUREC, 2018a, S. 7).

Windenergie

Das Prinzip der Windenergie ist schon alt und wurde in Dänemark entwickelt, wo bereits 1897 eine Windturbine zur Stromgenerierung in Betrieb genommen wurde. Von Europa aus verbreitete sich diese Art der Energiegewinnung in die USA und den Rest der Welt. Grundlage für die angewendete Technik ist der Wind¹⁴. Ab den Achtzigerjahren begann die Entwicklung der modernen Windenergieära mit der Massenproduktion in Dänemark. Die durch den Wind erzeugte kinetische Energie wird durch Windturbinen in elektrische Energie umgewandelt. Sie treibt den Rotor der Turbine zum Drehen an und durch einen angeschlossenen Generator kann diese Energie umgewandelt werden. Der Aufbau einer Windkraftanlage ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Die Anlage wird auf einem im Boden verankerten Fundament errichtet und am Ende des Turms befindet sich die Gondel die den Generator beinhaltet. Vorne an der Gondel ist die Nabe angebracht, an der wiederum die Rotorblätter montiert sind (IRENA, 2012b, S. 4; IRENA, 2016, S. 6-8).

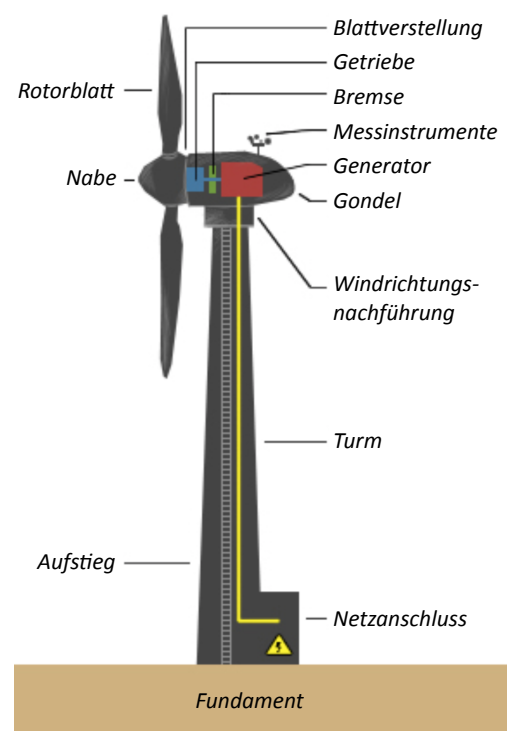


Abbildung 3: Aufbau einer Windkraftanlage (artaxo AG, 2018)

¹⁴ Winde sind horizontale Luftbewegungen, die durch Druckunterschiede an verschiedenen Orten entstehen (IRENA, 2016, S. 8).

Windenergieanlagen können in der Theorie maximal 59 Prozent der kinetischen Energie in mechanische Energie umwandeln. Heutzutage erreichen die modernsten Anlagen in der Praxis einen Wirkungsgrad von etwa 45 bis 50 Prozent. Die technischen Aspekte der Rotorblattflächen sowie deren Bauart und auch die Windgeschwindigkeit sind maßgeblich für die potenziell zu erreichende Leistung. Schon eine doppelte Windgeschwindigkeit erzeugt eine achtfache Windleistung. Die Leistung einer Windkraftanlage wird durch die Nennleistung des Generators beschrieben, welche bei einer spezifischen Windgeschwindigkeit erreicht wird und zwischen 11 und 15 Metern pro Sekunde (40 bis 54 Kilometern pro Stunde) liegt. Die Durchschnittskapazität der Windkraftanlagen hat sich in den letzten 20 Jahren verzwanzigfacht. Derzeit werden von den großen Herstellern bereits in nachfolgenden Generationen fünf bis sechs Megawatt starke Anlagen gebaut. Grundsätzlich können Windkraftanlagen darin unterschieden werden, ob die Achse der Windturbine horizontal oder vertikal ausgerichtet ist und ob sich die Anlage onshore (an Land) oder offshore (auf See) befindet. Vertikal ausgerichtete Windturbinen existieren nur in sehr limitierten Mengen, da sie im Vergleich weniger effizient sind. Die meisten Windkraftanlagen verfügen über drei Rotorblätter, die um eine horizontale Achse rotieren. Es können hier folgende Klassifikationen in der Bauweise unterschieden werden:

- Platzierung des Rotors (gegen oder mit dem Wind),
- Anzahl der Rotorblätter,
- Leistungsregulierung für den Generator,
- Nabenverbindung zum Rotor (starr oder schwenkbar),
- Bauweise des Getriebes (mehrstufiges mit schnelllaufendem Generator, einstufig mit mittelschnelllaufendem Generator oder Direktantrieb mit Synchrongenerator),
- Rotationsgeschwindigkeit des Rotors zur Erhaltung einer konstanten Frequenz (fest oder elektronisch gesteuert) und
- Windturbinenkapazität (IRENA, 2012b, S. 4-5; BWE, 2015, S. 50; Chen & Wang, 2017, S. 1).

Nach jahrzehntelanger Entwicklung und starkem Wachstum der Windindustrie gibt es heute weltweit in mehr als 90 Ländern kommerziell betriebene Windkraftanlagen. Neun Länder¹⁵ verfügen über eine erzeugte Leistung von jeweils mehr als 10.000 und 30 Länder über mehr als 1.000 Megawatt im Jahr (GWEC, 2018, S. 20).

In Abbildung 4 ist die Entwicklung der installierten Windenergieleistung weltweit zu sehen. Während vor 17 Jahren nur 23.900 Megawatt der Elektrizität durch Windkraft erzeugt wurden, waren es im letzten Jahr schon 539.123 Megawatt. Derzeit nimmt besonders die installierte Leistung in Asien zu,

¹⁵ Dazu gehören China, Indien, Deutschland, Spanien, Großbritannien, Frankreich, Brasilien, die USA und Kanada.

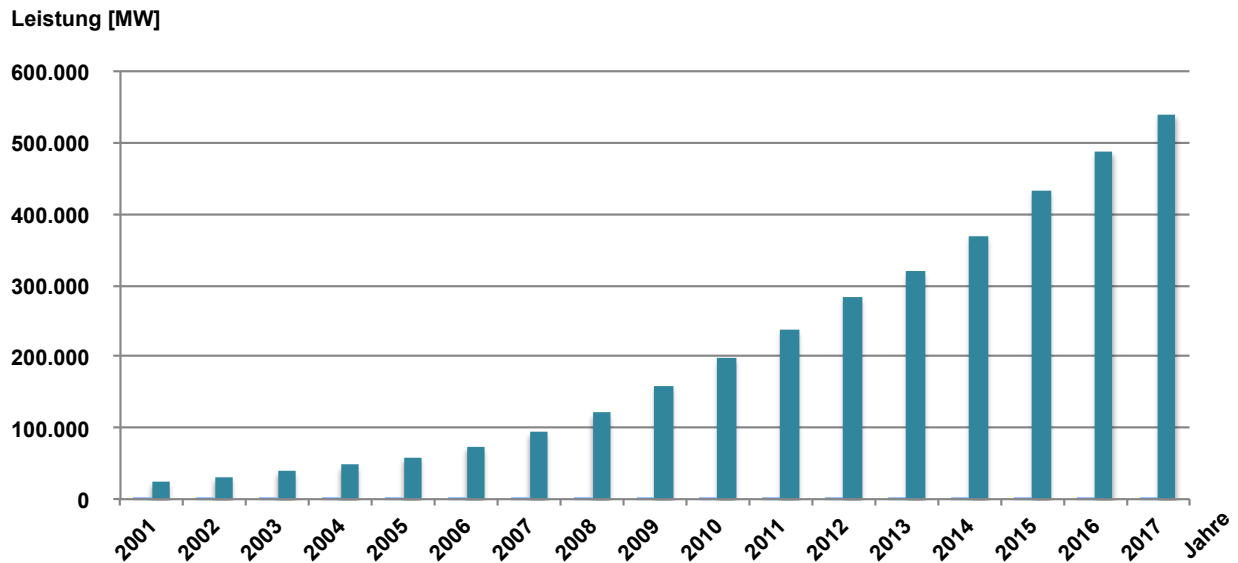


Abbildung 4: Kumulative global installierte Windkraftkapazität 2001-2017 (in Anlehnung an GWEC 2018, S. 20)

hervorzuheben sind hier vor allem China und Indien. Doch auch in Nordamerika und Europa wurde die durch Windkraft erzeugte Energie gesteigert. Europaweit war und ist ein unübertroffenes Wachstum der Windenergie zu verzeichnen, wodurch die Steinkohle als drittwichtigste Stromquelle abgelöst werden konnte. Bisher sanken zudem die Durchschnittskosten des Windstroms so weit, dass sie kaum noch höher als die der fossilen Brennstoffe liegen. In Lateinamerika und der Karibik dagegen ging die installierte Leistung leicht zurück, was neue Inbetriebnahmen in Argentinien noch 2018 wieder ausgleichen sollen. Im pazifischen Raum gewann lediglich die australische Windkapazität hinzu, während es in Neuseeland keine Veränderungen der Leistung gab. Südafrika war das einzige afrikanische Land, das 2017 neue Kapazitäten installiert hat. Durch geplante Projekte in Kenia, Marokko und Ägypten wird sich dies bis 2019 ändern. Auch die Investitionssummen in die Windenergie nahmen in den letzten Jahren kontinuierlich zu (Nizhegorodtsev & Ratner, 2016, S. 197-198; BWE, 2018a, S. 12; GWEC, 2018, S. 19-24).

3.3.2 Zahlen und Fakten zur Nutzung nachhaltiger Energien

Um die zuvor erläuterten Inhalte aus den Abschnitten 3.1 und 3.2 sowie die Entwicklung der globalen Energiewende zu veranschaulichen, stellen die nächsten Absätze die Situation global, in Europa und in den USA vor. Dabei werden aktive und geplante Initiativen und Gesetzgebungen der jeweiligen Länder und Staatengemeinschaften vorgestellt.

Weltweit

Im Zuge einer globalen Energiewende berücksichtigt der WEC in seinem *World Energy Trilemma Index 2017* verschiedene Aspekte in Bezug auf eine globale Energiewende. Dabei geht es vor allem um die nachhaltige Produktion der Energie auf Basis von Versorgungssicherheit, Energiegerechtigkeit und auf die Umwelt bezogene Nachhaltigkeit. Gemäß diesen Kriterien werden die Länder weltweit bewertet und es entsteht der sogenannte *Trilemma-Index*. 2015 konnten weltweit 19,3 Prozent des Energieverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Den *Trilemma-Index 2017* führt Dänemark vor Schweden und der Schweiz an. Unter den besten zehn Ländern findet sich Neuseeland als einziges nichteuropäisches Land auf Platz neun. Europa führt den Index vor Nordamerika an, danach folgen Lateinamerika und die Karibik, Asien, der mittlere Osten und Nordafrika sowie Subsahara-Afrika. Nicht jedes Land hat die gleichen Möglichkeiten, was die Auswahl an Energieressourcen angeht. Einigen Ländern fällt es aufgrund ihrer besonderen geografischen Lage oder klimatischer Bedingungen nicht schwer, schon heute einen Großteil, wenn nicht sogar den gesamten Energiebedarf durch erneuerbare Energien zu decken. Aus diesem Grund zählt es zu einer der größten Herausforderungen der globalen Energiewende, das Potenzial der erneuerbaren Energien zeitlich und räumlich je nach Bedarf auszuschöpfen und zugänglich zu machen (WEC, 2017b, S. 1-3; BGR, 2017, S. 93).

Die *Internationale Energieagentur*¹⁶ veröffentlichte 2017 den Bericht *Tracking Clean Energy Progress 2017*, um den aktuellen Stand sowie Zukunftsaussichten von Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien widerzuspiegeln. Die IEA schätzt, dass im Jahr 2015 etwa 27 Milliarden USD in die Forschung und Entwicklung von erneuerbaren Energien investiert wurden, der Trend ist derzeit jedoch nicht steigend (IEA, 2017, S. 66).

Europa

Bereits seit den Neunzigerjahren gehört die EU zu den Vorreitern des Einsatzes erneuerbarer Energien. Durch die Implementierung von Langzeitzielen und entsprechenden politische Maßnahmen konnte der Verbrauch an erneuerbaren Energien in den EU-Ländern in den letzten Jahren von neun Prozent (2005) auf über 16,7 Prozent (2015) gesteigert werden. Momentan sehen die Prognosen vor, dass die EU die für 2020 gesetzte 20 Prozent-Marke erreichen wird. 2014 wurde schon ein neues Ziel für 2030 festgelegt: bis dahin sollen die erneuerbaren Energien mindestens 27 Prozent der insgesamt erzeugten Energie ausmachen. Die EU hat zudem das *Pariser Klimaabkommen*¹⁷ ratifiziert, womit sie sich zu des-

¹⁶ Die *International Energy Agency* (IEA) ist eine unabhängige Agentur, die 1974 gegründet wurde und derzeit 29 Mitglieder hat. Ihre Hauptziele sind es, die Sicherheit der Energieversorgung zu gewährleisten und Forschung im Bereich der erneuerbaren Energien zu unterstützen (IEA, 2018).

¹⁷ Siehe zu diesem Thema Abschnitt 2.4 auf Seite 9.

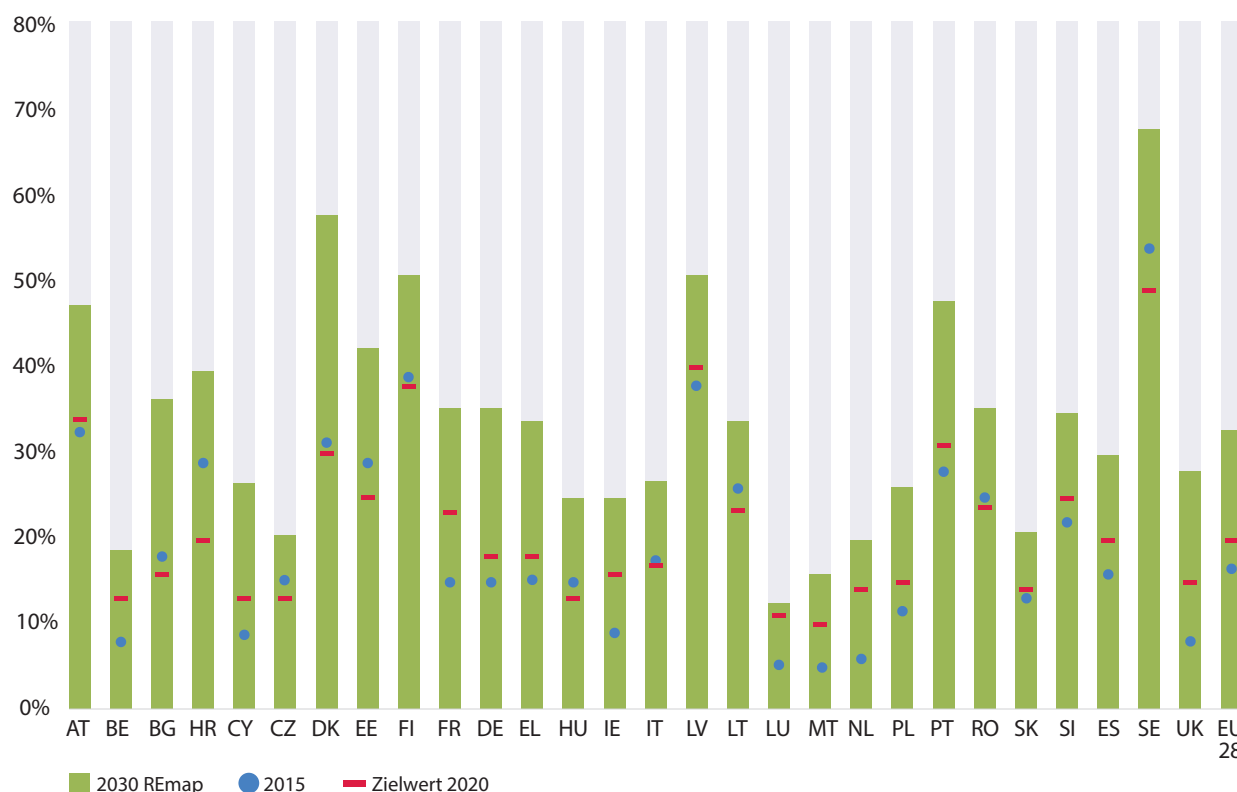


Abbildung 5: IRENA-Analyse zu den Anteilen an erneuerbaren Energien in 2015 sowie den Zielen für 2020 und 2030 (IRENA, 2018a, S. 21)

sen Vorgaben verpflichtet. Besonders aktuell ist das Programm *Clean Energy for All Europeans*, das die Europäische Kommission Ende 2016 erlassen hat. Dafür hat diese die *Internationale Organisation für erneuerbare Energien*¹⁸ damit beauftragt, die Aussichten für erneuerbare Energien in Europa bis 2030 zu bewerten. Darin wurden alle kosteneffizienten erneuerbaren Energien-Optionen in den Mitgliedsstaaten untersucht, um ihr jeweiliges Potenzial zu ermitteln (IRENA, 2018a, S. 15).

In Abbildung 5 wird nicht nur sichtbar, welche Länder sich hohe und welche eher niedrige Ziele gesetzt haben, sondern auch, zu welchem Grad sie diese bereits erreicht haben. Vor allem Schweden und Dänemark haben sich sehr hohe Ziele gesetzt und wollen mit jeweils knapp 70 und 60 Prozent einen großen Teil der benötigten Energie durch erneuerbare Quellen decken. Doch auch Österreich, Finnland, Lettland und Portugal haben mit etwa 50 Prozent hohe Ziele. Die kleineren Länder wie Luxemburg und Malta, die sich die Erreichung von weniger als 20 Prozent erneuerbarer Energien als Ziel gesetzt haben, befinden sich am unteren Rand (IRENA, 2018a, S. 21).

¹⁸ Die *International Renewable Energy Agency* (IRENA) ist eine zwischenstaatliche Organisation, die weltweit Länder dabei unterstützt, den Wandel hin zu erneuerbaren Energien zu erreichen (IRENA, 2018b).

Zusammenfassend lässt sich die europäische Energiewende in fünf wesentlichen Entwicklungen zusammenfassen:

1. Auch 2017 stieg der Anteil der erneuerbaren Energien an, mit besonders großem Wachstum in den Bereichen Wind, Solar und Biomasse.
2. Die Verteilung des Wachstums unter den EU-Staaten wird ungleicher: Deutschland und Großbritannien sind mehr als 50 Prozent des Wachstums in dem Bereich der erneuerbaren Energien zuzuordnen, was teils besonders guten Windbedingungen für Anlagen in der Nordsee zugeschrieben werden kann.
3. Der Elektrizitätsverbrauch stieg 2017 um 0,7 Prozent an, was einen dritten jährlichen Anstieg in Folge bedeutet.
4. Die CO₂-Emissionen des europäischen Energiesektors blieben 2017 auf unverändertem Niveau und stiegen in einigen Ländern sogar, was schätzungsweise einem Zuwachs von einem Prozent entspricht.
5. Westeuropa fährt schrittweise seine Kohleindustrie zurück, doch Osteuropa bleibt weiterhin dabei, Kohlekraftwerke zu betreiben (Agora Energiewende & Sandbag, 2017, S. 3).

Auch wenn nicht alle Entwicklungen durchwegs der angestrebten Zielverfolgung des Pariser Klimaabkommens entsprechen, wird die Richtung der Veränderungen deutlich. Zumindest wird durch Expert-/innen bestätigt, dass eine schnellere Dekarbonisierung des Energiesektors möglich ist und bis 2030 wirtschaftlich noch attraktiver werden könnte als angenommen. Wichtig dafür ist u.a. das Potenzial der Energieversorgungssysteme entsprechend große Mengen an erneuerbaren Energien aufzunehmen. Der Ausstieg aus der Energiegewinnung durch Kohle bleibt Fachleuten zufolge unerlässlich, um die Möglichkeiten und Kostenvorteile der erneuerbaren Energien voll nutzen zu können. Grundsätzlich würde eine Vernetzung in der EU dazu führen, dass Interdependenzen in den Elektrizitätsnetzen besser genutzt werden könnten. So kann auch die Versorgungssicherheit verbessert werden (ECF, 2017, S. 4).

USA

Nicht nur aufgrund ihrer Größe und Wirtschaftsstärke sind die USA ein wichtiger Akteur in Sachen Klimawandel und Energiewende. Auch in Bezug auf den Energieverbrauch liegt in diesem Land ein großes Potenzial, da dieser pro Kopf weltweit der höchste ist. Er übersteigt den Verbrauch anderer Industrieländer um ein weites und liegt mit 300 Gigajoule pro Jahr und Person doppelt so hoch wie

beispielsweise in Japan oder Europa¹⁹. Das *Büro für Energieeffizienz und erneuerbare Energien*²⁰, das dem *US-Energieministerium*²¹ untergeordnet ist, nennt in seinem *EERE Strategic Plan* für die Jahre 2016 bis 2020 sieben Hauptziele, von denen fünf direkt und zwei indirekt den Ausbau erneuerbarer Energien fördern sollen. Dabei geht es um

1. die Beschleunigung der Entwicklung und Implementierung nachhaltiger Energiesysteme;
2. den Anstieg der Energiegewinnung aus erneuerbaren Ressourcen;
3. die Verbesserung der Energieeffizienz in privaten Haushalten, Gebäuden und in der Industrie;
4. die Wachstumsförderung des heimischen Marktes für erneuerbare Energien;
5. die Integration erneuerbarer Energien in verlässliche, stabile und effiziente Elektrizitätsnetze;
6. die Verbesserung bundesstaatlicher Nachhaltigkeit und den Einsatz sauberer Energien sowie
7. das Ermöglichen einer hochleistungsfähigen, umsetzungsorientierten Kultur durch effektivere Managementprozesse (Vitale, 2016, S. 1; US Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy, 2016, S. 1-2).

Auch in den USA gibt es eine Orientierung in Richtung erneuerbarer Energien und einer nachhaltigeren Wirtschaft. Um die gesetzten Ziele zu erreichen, ist jedoch eine enge Zusammenarbeit an vielen Schnittstellen notwendig. Darin eingeschlossen sind Akteure wie die staatlichen Energiebehörden, die Wirtschaft, Umweltsysteme und die Industrie sowie andere teilhabende Organisationen. Gerade mit Hinblick auf die derzeitige politische Lage und den angekündigten Ausstieg aus dem Pariser Klimaabkommen ist der Weg der USA in Richtung einer nachhaltigeren und saubereren Energieversorgung und den daraus resultierenden geringeren CO₂-Emissionen noch nicht klar vorgezeichnet (US Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy, 2015, S. 4; Rhodes, 2017, S. 411).

¹⁹ Bei gleichem Lebensstandard liegt der Energieverbrauch dort bei nur knapp 150 Gigajoule pro Jahr und Person.

²⁰ Das *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* (EERE) ist zuständig für die Förderung und Implementierung erneuerbarer Energien in den USA (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2018).

²¹ Das *US Department of Energy* ist das in den USA für Energie zuständige Ministerium, das sich neben der Versorgungssicherheit sowohl mit Umwelt- und Nuklearthemen als auch mit Energiewissenschaft und -technologien auseinandersetzt (US Department of Energy, 2018).

4 Seltene Erden

In den Kapiteln 2 und 3 wurde bereits erläutert, welche Folgen des Klimawandels sich bis dato herleiten lassen und inwieweit die Erde und die Weltbevölkerung bereits davon betroffen sind. Die Energiewende gilt als mögliche Gegenmaßnahme und, wie schon beschrieben, haben es sich die meisten Länder weltweit zum Ziel erklärt, erneuerbare Energien zu fördern und den Verbrauch fossiler Brennstoffe einzuschränken.

Um auf fossile Brennstoffe zu verzichten und diese folglich durch Alternativen zu ersetzen, müssen die Kapazitäten erneuerbarer Energien weiter ausgebaut werden. Technologien wie Windturbinen, Solarzellen oder Elektromotoren dominieren in der heutigen Zeit das Feld der emissionsneutralen Energiesysteme. Durch die Umstellung auf alternative Energiekonzepte ergeben sich jedoch auch Probleme. Viele der zuvor genannten Systeme sind stark abhängig von bestimmten Materialien, so auch von seltenen Erden. Diese Materialien sind mitunter nur schwer zu gewinnen oder unterliegen aufgrund eingeschränkter Verbreitung sowohl Lieferungs- als auch Preisschwankungen. Das Vorankommen der Energiewende könnte von der Verfügbarkeit dieser Materialien, insbesondere seltener Erden, eingeschränkt werden (Habib & Wenzel, 2014, S. 348; Apergis & Apergis, 2017b, S. 33).

Seltene Erden sind elementar für bestimmte Technologien, vor allem für die effiziente Funktionsweise einiger erneuerbarer Energiesysteme. Im Jahr 2009 schränkte China, das als Hauptlieferant seltener Erden fungiert, die Exporte stark ein, was zu erheblichen Preissteigerungen führte²². Auch wenn China seine Exportraten wenige Jahre danach wieder anhub und die Preise wieder sanken, betrachten viele Fachleute aus Wirtschaft und Wissenschaft diese Entwicklung nach wie vor als besonders kritisch. Sie sehen insbesondere die Produktion von Magneten für Windturbinen und Elektromotoren durch mögliche Lieferengpässe der dafür benötigten seltenen Erden in Gefahr. Auch auf politischer Ebene haben viele Akteure bereits gehandelt und seltene Erden nicht nur als kritisch eingestuft, sondern auch Maßnahmen zur Beseitigung des Lieferrisikos eingeleitet²³ (Raman, 2013, S. 172).

In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften und relevanten Zusammenhängen der seltenen Erden näher erläutert. Abschnitt 4.1 befasst sich mit denjenigen Eigenschaften, die die seltenen Erden ausmachen sowie mit deren Herkunft und Abbau. Abschnitt 4.2 gibt einen Überblick über die Marktsituation der seltenen Erden sowie einige politische Aspekte in Bezug auf die Importabhängigkeit vieler Länder. Abschnitt 4.3 diskutiert die End-of-Life-Betrachtung seltener Erden und was nach deren Verwen-

²² Siehe zu diesem Thema Unterabschnitte 4.2.1 und 4.2.2

²³ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.2.3

derung mit ihnen geschehen kann. Danach legt Abschnitt 4.4 dar, inwiefern seltene Erden als Material in Windkraftanlagen eine Rolle spielen und deren Produktion beeinflussen.

4.1 Definition seltener Erden

Kritische und auch als energiekritisch bezeichnete Elemente sind chemische und isotopische Zusammensetzungen, die über besondere und teils einzigartige physikalische Eigenschaften verfügen. Als kritisch werden solche Elemente bezeichnet, deren Qualität, Zustand oder Ausmaß von äußerster Wichtigkeit ist. Das heißt, solche Elemente sind von besonderer Bedeutung für das Funktionieren eines Systems in der Technologie, einem Unternehmen, einem Staat oder weltweit, unterliegen jedoch einem besonders hohen Versorgungsrisiko. In den USA haben 2009 die *American Physical Society*²⁴ sowie die *Materials Research Society*²⁵ den Begriff *energy-critical elements* als Bestandteile neuer Energiesysteme für bestimmte Elemente festgelegt. Bis zur Veröffentlichung der ersten Studie hatten bereits mehrere Länder Initiativen ergriffen, um Strategien gegen das Lieferisiko kritischer Elemente zu entwickeln. In Europa hat das *European Rare Earths Competency Network*²⁶ zuletzt 2015 einen Bericht über die für Europa kritischen Elementen herausgebracht. Auf diese Weise wurden in den vergangenen Jahren gewisse Elemente den seltenen Erden zugeordnet (Hurd et al., 2012, S. 405; ERECON, 2015; Nassar et al., 2015, S. 2; Habib et al., 2016, S. 850; Van Gosen et al., 2017, S. 1).

Materialien, die seltene Erden beinhalten, werden in der Herstellung von Komponenten verwendet, die wiederum in der Endanwendung von Geräten und Anlagen verbaut werden. Wie eingangs erwähnt, gehören zu diesen Endprodukten auch erneuerbare Energiesysteme. Man verwendet seltene Elemente für die Beschichtung von Solarzellen, als Permanentmagnete in Windgeneratoren und Elektromotoren, in Batterietechnologien und als Leuchtstoffmaterialien. Der Begriff *seltene* Erden täuscht über die tatsächliche Verfügbarkeit seltener Erden hinweg. Das Vorkommen dieser Elemente in Erdschichten weltweit ist nicht selten, doch deren Gewinnung stellt einen verhältnismäßig großen Aufwand dar. Um seltene Erden abzubauen, müssen komplexe und weitreichende Bergbauinfrastrukturen geschaffen werden. Dazu kommt, dass China seit Beginn des Abbaus über ein Monopol am Markt verfügt, da es weit mehr als 90 Prozent des weltweiten Bedarfs abbaut und exportiert. Aufgrund der vielfältigen Verwendung besonders in neuen Technologien sowie im Bereich der erneuerbaren Energien betrachten viele Länder

²⁴ Die *American Physical Society* (APS) ist eine US-amerikanische Gesellschaft, die aus Physikern besteht, deren Ziel es ist, die Wissenschaft Physik zu fördern und weiterzubringen (APS, 2018).

²⁵ Die *Materials Research Society* (MRS) ist eine nicht gewinnorientierte, professionelle Organisation, die aus Materialforscher/innen, Wissenschaftler/innen und Ingenieur/innen besteht, die interdisziplinär in den Bereichen Physik, Chemie, Biologie, Mathematik und Ingenieurwesen forschen (MRS, 2018).

²⁶ Das *European Rare Earths Competency Network* (ERECON) wurde von der Europäischen Kommission gegründet, um die Versorgung der EU mit seltenen Erden zu sichern (ERECON, 2018).

die seltenen Elemente als kritisch in Bezug auf die Liefer- sowie die Preisstabilität und initiieren Forschung in Bereichen wie Substituierung, Recycling und Abbau im eigenen Land²⁷. Außerdem versuchen besonders importabhängige Länder, ihre Beziehungen zu chinesischen Lieferanten zu stärken und Langzeitverträge abzuschließen (Massari & Ruberti, 2013, S. 36; Golev et al., 2014, S. 52; Habib & Wenzel, 2014, S. 348-350; Apergis & Apergis, 2017b, S. 34).

Bis zum Ende des letzten Jahrhunderts spielten die seltenen Erden in den Materialwissenschaften und herkömmlichen Technologien kaum eine Rolle. Erst zu Beginn des 21. Jahrhunderts gewannen diese speziellen Elemente immer mehr Bedeutung und erlangten auch medial mehr Aufmerksamkeit. Dies ist vor allem in nachstehenden Aspekten begründet:

1. Forschung und Industrie konzentrierten sich auf die besonderen Eigenschaften der seltenen Erden sowie deren Verwendung in modernen Technologien.
2. Das Bewusstsein wuchs in der Hinsicht, dass eine nahezu vollkommene Marktmacht bei nur einem Land (China) liegt.
3. Es bestand eine große Importabhängigkeit aller anderen Länder von China, das die Liefermengen und -preise festlegt.

Im Jahr 2009 verkündete China, dass es seine Exporte deutlich verringern würde. Dies geschah zu einem Zeitpunkt, zu dem die Entwicklung von und die Nachfrage nach seltenen Erden in den Bereichen erneuerbare Energien sowie Militär bereits deutlich anstieg. Dies erregte vor allem in Technologie geprägten Ländern wie Japan, den USA und der EU Besorgnis (Van Gosen et al., 2017, S. 2).

In Bezug auf die Verfügbarkeit seltener Erden und deren Verwendung in zukunftssträchtigen Technologien bleibt fraglich wie die Langzeitperspektiven aussehen werden. Ungeklärt ist auch, welche Folgen die mögliche Knappheit oder Lieferengpässe für den Sektor der erneuerbaren Energien haben werden (Nassar et al., 2015, S. 1). In den folgenden Unterabschnitten werden verschiedene Aspekte der seltenen Erden im Detail erläutert. Unterabschnitt 4.1.1 befasst sich mit den chemischen und physikalischen Eigenschaften seltener Erden sowie deren Verwendungsgebieten, während Unterabschnitt 4.1.2 das Vorkommen seltener Erden sowie die Abbauprozesse behandelt. Im Anschluss befasst sich Unterabschnitt 4.1.3 mit den Umweltschäden, die mit dem Abbau seltener Erden einhergehen.

²⁷ Diese Aspekte werden im Detail in den Unterabschnitten 4.2.3, 4.3.1 und 4.3.2 behandelt.

4.1.1 Besondere Eigenschaften

Seltene Erden umfassen die 15 Elemente der Lanthanoide von den chemischen Ordnungszahlen 57 bis 71 sowie oft auch die physikalisch sehr ähnlichen²⁸ Elemente Yttrium und Scandium mit den Ordnungszahlen 39 und 21. Alle diese Elemente gehören zu der Gruppe der Metalle. Auch wenn die Vorkommen seltener Erden in der Erdkruste sehr verbreitet sind, sind höhere Konzentrationen der Metalle selten anzufinden. Die besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften der seltenen Erden machen sie attraktiv für die Nutzung im Industrie- und Energiesektor wie auch im militärischen Bereich oder die Glasindustrie. Die magnetischen Eigenschaften sind bei den seltenen Erden sehr stark ausgeprägt, weshalb sie für spezielle Anwendungen ausschließlich eingesetzt werden. So sorgt Neodym in einer Eisen-Bor-Legierung für die stärksten derzeit bekannten magnetischen Eigenschaften. Solche Magnete kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn die verwendete Technologie möglichst wenig Gewicht und Raum einnehmen soll. Neodym wird ebenso für die Herstellung besonders effizienter Permanentmagnete benötigt, welche in Windturbinen zum Einsatz kommen. Bei Neodym handelt es sich um ein weiches, silberfarbenes Metall. Seltene Erden werden, jeweils abhängig von ihrer Funktion und ihrem Applikationsgebiet, in verschiedenen Formen eingesetzt. Sie können in reiner Form verwendet oder in kleinen Mengen zu anderen chemischen Komponenten hinzugegeben werden. Die häufigste Verwendung sind jedoch Legierungen und Mischungen. Im Fachbereich werden sie auch als *Vitamine* bezeichnet, da bereits sehr kleine Mengen an seltenen Erden ausreichen, um durch ihre besonders stark ausgeprägten Eigenschaften eine deutliche Effizienzsteigerung vieler Anwendungen zu erreichen (Hurd et al., 2012, S. 405; Golev et al., 2014, S. 52; Van Gosen et al., 2017, S. 1).

Im Periodensystem in Abbildung 6 sind die jeweils als kritisch bewerteten Elemente blau hervorgehoben. Oben links sind die Elemente Scandium und Yttrium positioniert, während die eigentlichen seltenen Erden in den unteren Reihe in der Gruppierung der Lanthanoide zu sehen sind. Des Weiteren gibt es eine Aufteilung der seltenen Erden in leichte seltene Elemente und schwere seltene Elemente, die gemäß ihres atomaren Gewichts einer dieser Gruppen zugeordnet werden. Zu der leichten Kategorie gehören die Elemente Lanthanum bis Europium einschließlich Scandium und zu der schweren Kategorie zählen die Elemente von Gadolinium bis Lutetium sowie Yttrium. Diese Einteilung ist ebenfalls aus der Grafik ersichtlich. Die Elemente Dysprosium, Neodym, Terbium, Yttrium und Europium sind besonders wichtig für die Herstellung und Funktion erneuerbarer Energiesysteme. Neodym, ein leichtes seltenes Element, gehört zu den derzeit am häufigsten in der Windindustrie eingesetzten seltenen Erden. Es ist häufig

²⁸ Seltene Erden sowie Yttrium und Scandium verfügen über die gleiche trivalente Ladung und besitzen zudem denselben Ionenradius.

1																	2
H																	He
3	4	Ordnungszahl										5	6	7	8	9	10
Li	Be	Symbol										B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57-71 Lantha- noide	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89-103 Acti- noide	104	105	106	107	108	109	110	111	112		114		116		
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn		Fl		Lv		

Lanthanoide	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Actinoide	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Abbildung 6: Seltene Elemente im Periodensystem (in Anlehnung an ERECON, 2015, S. 16)

anzufinden und liegt nicht in reiner Form, sondern oft zusammen mit Lanthanum und Cerium vor (Haque et al., 2014, S. 615; ERECON, 2015, S. 16; Dutta et al., 2016, S. 184; Europäische Kommission, 2017, S. 404).

4.1.2 Vorkommen und Abbau

Metalle bestimmen seit jeher das Leben der Menschen und bieten bis heute als Material die Grundlage für Industrie und Technologie. Metalle entstehen durch geologische Prozesse in der Erdkruste und sind daher nur beschränkt verfügbar. Doch im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen wie Kohle, Erdöl oder -gas werden sie nicht chemisch umgewandelt und verbraucht, sondern können nach ihrem Einsatz wiederverwertet werden. Die seltenen Erdmetalle kommen in der Erdkruste in verschiedenen Konzentrationen vor. Neben den unterschiedlichen Konzentrationen dieser Elemente kommt es durch Faktoren wie Politik, soziale Zwänge, Gesetze, Umweltrichtlinien, Nutzungsbeschränkungen von Flächen, Wirtschaft und Infrastruktur zu weiteren Einschränkungen der Verfügbarkeit. Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, sind seltene Erden nicht dem Namen entsprechend rar. Doch die Förderung dieser Metalle ist mit exzessivem Aufwand verbunden. Bei selten vorkommenden Metallen wird zwischen physikalischer Seltenheit und wirtschaftlicher Knappheit unterschieden. Die physikalische Seltenheit meint das relative Vorkommen eines Elements in einem festgesetzten Teil der Erde, während sich die wirtschaftliche Knappheit auf die Absatz- und Beschaffungskosten bezieht, die unter bestimmten Bedingungen abhängig von Ort und Zeit entstehen (Habib et al., 2016, S. 850; Schulz et al., 2017a, A2, A6).

Grundsätzlich sind die seltenen Elemente zusammen in bestimmten Erdschichten anzufinden, da sie ähnliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen. Seltene Erden sind nicht separat als Elemente, sondern als Verbindung in diversen Mineralien vorhanden wie z.B. Silikaten, Oxiden und Carbonaten. Die zwei Gebiete mit den weltweit größten und zweitgrößten Vorkommen an seltenen Erden sind *Mountain Pass* in Kalifornien und *Bayan Obo* in China. Weitere große Vorkommen befinden sich in Australien und Brasilien. Aus Tabelle 1 auf der nächsten Seite sind weitere derzeit lokalisierte Vorkommen mit laufenden Explorationsprojekten sowie aktiven Minen weltweit aufgeteilt nach Regionen ersichtlich. Hieraus ist zu erkennen, dass in China mit einer Anzahl von sieben Minen mit Abstand der meiste aktive Abbau seltener Erden erfolgt. Schätzungen des *US Geological Survey* zufolge gibt es in China Reserven von etwa 55.000.000 Tonnen an seltenen Erden, was einem globalen Gesamtanteil von etwa 39 Prozent entspricht. In Ländern wie Kanada und einigen afrikanischen Staaten existieren jeweils mehrere fortgeschrittene Projekte in Bezug auf die Gewinnung seltener Erden. Dagegen findet man neben den chinesischen nur wenige aktive Minen in anderen Ländern. In Südafrika, Vietnam, Russland und Brasilien gibt es jeweils eine aktive Mine. Diese Minen sind jedoch deutlich kleiner als jene, die in China aktiv sind (Smith Stegen, 2014, S. 3; Van Gosen et al., 2017, S. 6-9).

Bereits zu Sowjetzeiten wurden in Zentralasien seltene Erden gefördert und weiterverarbeitet. Auch heute noch ist diese Region Quelle für den Abbau seltener Elemente sowie anderer wertvoller Metalle. Aufgrund der hohen Nachfrage nach diesen Elementen wächst in dieser Region das Interesse am Abbau. Besonders Länder wie Kasachstan, Kirgisistan und Tajikistan fördern die Erforschung von potenziellen Förderungsgebieten und versuchen durch Reformen ausländische Investoren zu gewinnen (Van Gosen et al., 2017, S. 12; Mihalasky, Tucker, Renaud, & Verstraeten, 2017, S. 1).

Für den Abbau von Metallen und metallischen Produkten werden zahlreiche Techniken benötigt. Die Auswahl einer bestimmten Abbautechnik ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie der Art des Vorkommens der Metalle, dem Ort und der Tiefe der Erzreserven sowie der Mineralogie des Abbaugebiets. Seltene Erden, die in hartem Gestein vorkommen, werden in der Regel im Tagebau gefördert, so beispielsweise in *Bayan Obo* in China oder *Mountain Weld* in Australien. Seltene Erden können hier aber gleichzeitig auch durch Untertagebau gewonnen werden. Beide Techniken erfordern Abbauprozesse wie Bohrungen, Sprengungen, Verladung und Förderung. All diese Prozesse lösen große landschaftliche Veränderungen aus. Außerdem kommt es zu einer exzessiven Landnutzung aufgrund der Grabungen und Abtragungen von Erdmasse sowie zu dem Entfernen großer Mengen an Festgestein im Verhältnis zum Umfang der gewonnenen Erze. Da Techniken wie Tunnelbau, Belüftung und Beleuchtung sehr energieintensiv sind, wird für den Untertagebau mehr Strom und Wasser benötigt als für den Tagebau. Dort gibt es jedoch einen größeren Maschineneinsatz und somit einen höheren Treibstoffverbrauch (Weng et al., 2016, S. 1283).

Kontinent	Land	aktive Minen	fortgeschrittene Projekte
Afrika	Kenia	-	1
	Madagaskar	-	1
	Malawi	-	1
	Namibia	-	1
	Südafrika	1	2
	Tansania	-	2
Asien	China	7	-
	Indien	-	2
	Kirgisistan	-	2
	Türkei	-	1
	Vietnam	1	-
Europa	Grönland	-	2
	Norwegen	-	1
	Russland	1	-
Nordamerika	Kanada	-	12
	USA	-	4
Südamerika	Brasilien	1	1

Tabelle 1: Aktive und potenzielle Abbauorte seltener Erden (in Anlehnung an Van Gosen et al., 2017, S. 9)

4.1.3 Umweltgefährdung durch den Abbau

Der Abbau seltener Erden bringt deutliche Beeinträchtigungen der Umwelt mit sich. Doch auch die nachgelagerten Prozesse, die im Anschluss an den Tage- oder Untertagebau folgen, gefährden die umgebene Landschaft und das Ökosystem. Um der Wertschöpfungskette wenige Kilogramm seltene Erden zu entnehmen, müssen viele Tonnen Gestein bewegt werden. Während der Vergütungsschritte im Verarbeitungsprozess seltener Erden wird eine weitere Trennung der gewonnenen Minerale ermöglicht. Die Trennung der verschiedenen Stoffe wird durch die Nutzung der verschiedenen physikalischen Eigenschaften wie Magnetisierung, Dichte und Oberflächenionisierung erreicht. Dabei kommen Zerkleinerungs- und Mahltechniken zum Einsatz. Im Anschluss daran wird die Produktionsstätte geschwemmt, um die gewünschten Endprodukte herauszufiltern und die Reinheit zu verbessern. Danach

folgt die Veredelung, für die hauptsächlich hydrometallurgische Techniken angewendet werden. Hierzu gehören auch verschiedene thermische Verfahren, die einen hohen Einsatz an Energie und Chemie erfordern. Dadurch ergeben sich zahlreiche negative Auswirkungen auf die Umwelt wie Dammbrüche, verschmutztes Abwasser, chemische Verschmutzung, gefährliche Rückstände sowie die radioaktive Verunreinigung der Böden, des Grundwassers und der Vegetation. Solche Umweltschäden haben sich bereits ereignet. In der *Mountain Pass Mine* in Kalifornien gab es verschiedene Abwasserlecks, durch die hunderttausende Liter radioaktiv verschmutzten Wassers in einen See und dessen Umgebung gelangten. Aus diesem Grund wurde im Jahr 1998 die chemische Aufbereitung in der Mine beendet (US Environmental Protection Agency, 2012, 6-1; Margonelli, 2009; Weng et al., 2016, S. 1282-1283).

Aktivität	Emissionsquelle	Hauptschadstoffe
Abbau (Tagebau und Untertagebau)	Aushub	radiologische Schadstoffe
	taubes Gestein	Metalle
	Unter-Erzvorrat	durch die Mine verschmutztes Wasser
	Erzvorrat	saurer/ basischer/ neutraler Haldenabfluss
Verarbeitung		Staub und damit verbundene Schadstoffe
	Mahlen/ Zerkleinern	Staub
	Abgänge	radiologische Schadstoffe
	Abgänge im Staubecken	Metalle
Recycling	flüssiger Abfall	Trübung
		organische Schadstoffe
		Staub und damit verbundene Schadstoffe
	Einsammeln	Schadstoffe während Transport
	Zerlegung und Separation	Staub und damit verbundene Schadstoffe
	Abfallprodukte	flüchtige organische Verbindungen (VOCs)
	Geländeauffüllung	Metalle
		organische Schadstoffe
	Verarbeitung	Staub und damit verbundene Schadstoffe
		flüchtige organische Verbindungen (VOCs)
		Dioxin
		Metalle
		organische Schadstoffe

Tabelle 2: Zusammenfassung der Schadstoffe beim Abbau und der Verarbeitung seltener Erden (in Anlehnung an US Environmental Protection Agency, 2012, 6-2)

Es gibt unterschiedlichste Auswirkungen des Abbaus seltener Erden auf Mensch und Umwelt. Alle möglichen bisher bekannten Beeinträchtigungen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die US-amerikanische Behörde

für Umweltschutz hat diese Auflistung 2012 erstellt. Die Umwelteinflüsse des Abbaus seltener Erden sind aufgeteilt in die Prozesse Bergbau, Weiterverarbeitung und Recycling. Die Radioaktivität wird in bestimmten Produktionsprozessen besonders gefährlich, z.B. dann, wenn das Element Thorium freigesetzt wird. Thorium setzt radioaktive Alphastrahlung frei, die zwar keinen weiten Radius hat, aber dafür besonders gefährlich für Organismen ist, besonders dann, wenn es eingeatmet wird. Für die Flutungen der Produktionsstätten werden komplexe organische und anorganische Reagenzienstoffe verwendet. Bei Vorliegen eines Lecks können diese Stoffe in die Umwelt und ins Grundwasser gelangen, wo sie erhebliche Schäden anrichten können. Gerade die Verschmutzung von Grundwasser und somit die Gefährdung nachgelagerter Trinkwasserquellen stellt die häufigste Negativfolge des Abbaus dar. Aufgrund der im Abbau verwendeten gefährlichen Substanzen gibt es diverse Sicherheitsmaßnahmen zu beachten. Diese werden vom Gesetzgeber erlassen und sind in den Sicherheitskonzepten der Minenbetreiber zu berücksichtigen. Die Sicherheitsvorkehrungen werden umso strenger, je näher ein Abbaugbiet an bewohnten Arealen liegt. Die größten Bedenken hinsichtlich gesundheitlicher Beeinträchtigungen haben Fachleute bisher bezüglich der radioaktiven Eigenschaften von Thorium. Bisher gibt es jedoch keine verlässlichen Studien zur Auswirkung der Thoriuminhalation. Gerade in China, wo die größten Mengen an seltenen Erden abgebaut werden, ist die Produktion nicht öffentlich einsehbar. Somit konnten bislang noch keine allgemeinen Studien hierzu durchgeführt werden (US Environmental Protection Agency, 2012, 6-1; Ali, 2014, S. 129-130).

4.2 Marktüberblick seltener Erden

Das im Zuge des Klimawandels entstandene Bestreben, die klimatischen Veränderungen abzuwenden, führte in den letzten Jahren zu einem stark erhöhten Bedarf an seltenen Erden. Wie bereits in Abschnitt 4.1 sowie im Detail in Unterabschnitt 4.1.1 erläutert, eignen sich diese Metalle aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften besonders gut für Technologien im Bereich der erneuerbaren Energien. Sie kommen in Windturbinen zum Einsatz und werden in der Elektromobilität für Batterien und Elektromotoren verwendet, die knapp 30 Prozent der weltweiten Produktion ausmachen. Das gesamte Spektrum der Verwendung seltener Erden ist aus Abbildung 7 auf der nächsten Seite ersichtlich. Den größten Anteil machen mit 24 Prozent die Katalysatoren aus, während gleich darauf die Magnete mit einem Anteil von 23 Prozent folgen.

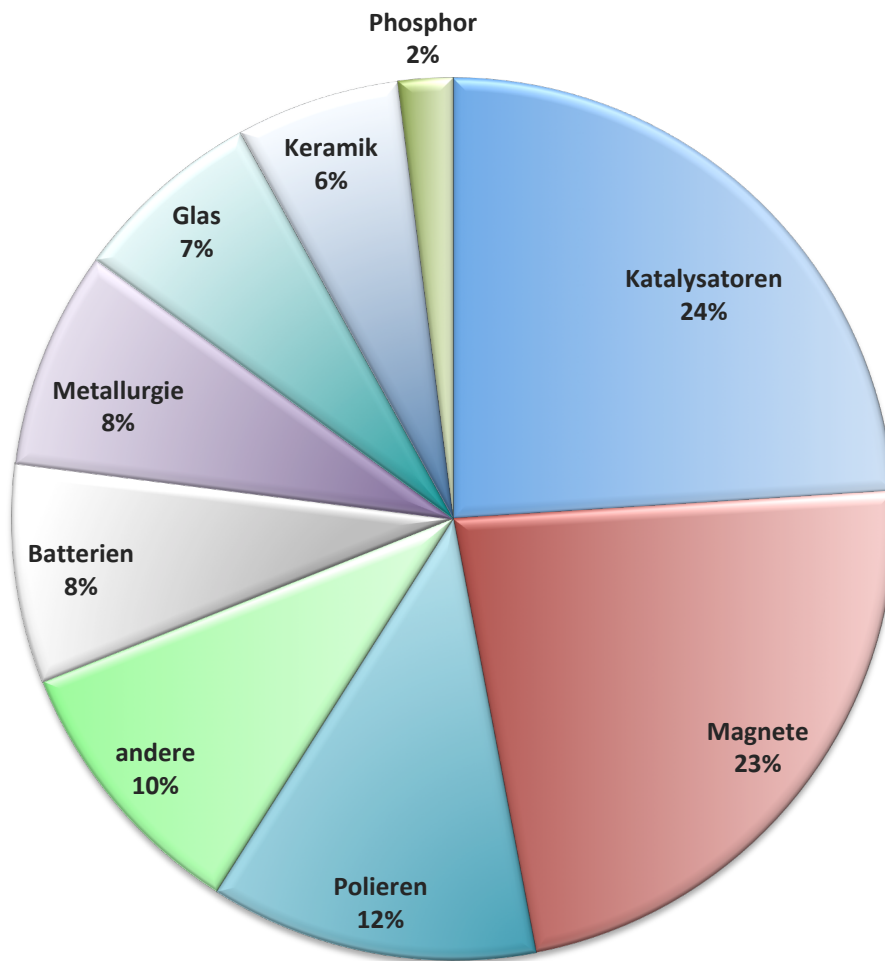


Abbildung 7: Spektrum der Verwendung seltener Erden (in Anlehnung an Goodenough et al., 2018, S. 202)

Durch das rasante Wachstum dieser Wirtschaftszweige wird auch die Nachfrage nach seltenen Erden immer größer. Besonders aufgrund der Dominanz Chinas in diesem Marktsegment haben sowohl die Wissenschaft als auch die Wirtschaft bereits mehrmals schwerwiegende Lieferengpässe prognostiziert. In Folge der Verschiebung der Marktmacht in Richtung Chinas sowie der Bedeutung der seltenen Erden für die Industrie vergleichen einige Wissenschaftler die Marktsituation dieser Metalle mit der der Gewürze im 17. Jahrhundert oder dem Erdöl im Nahen Osten in den letzten Jahrzehnten (Raman, 2013, S. 173; Smith Stegen, 2014, S. 2; Baldi et al., 2014, S. 53).

In den folgenden vier Unterabschnitte wird näher auf die Thematik der Märkte seltener Erden eingegangen. Unterabschnitt 4.2.1 beschreibt die Monopolsituation Chinas im Markt der seltenen Erden, Unterabschnitt 4.2.2 erläutert die Preissituation sowie kürzliche Anstiege und Unterabschnitt 4.2.3 stellt Maßnahmen gegen Lieferengpässe importabhängiger Länder vor.

4.2.1 China als Monopolinhaber

Wie bereits in Unterabschnitt 4.1.2 beschrieben, sind die Vorkommen seltener Erden nicht gleichmäßig auf alle Kontinente verteilt, sondern konzentrieren sich nach derzeitigen geologischen Erkenntnissen auf bestimmte Regionen. Da nur wenige Länder über solche Vorkommen als auch die notwendigen Abbautechniken verfügen, muss die Mehrheit jener Staaten, die seltene Erden benötigt, diese Metalle importieren. Da China über die meisten aktiven Minen verfügt und den größten Teil der weltweiten Produktion abdeckt, wird es zum Hauptlieferanten. Ein geopolitisches Versorgungsrisiko besteht für die meisten Länder. Insbesondere für Europa entstehen so Importabhängigkeiten von der Marktmacht China (Habib et al., 2016, S. 850).

China dominiert weltweit nicht nur den reinen Abbau der schweren und leichten seltenen Erden, sondern auch die Weiterverarbeitung und größtenteils die Produktion von daraus entstehenden Komponenten wie Permanentmagnete. Vielfach wird davon ausgegangen, China verfüge über die Mehrheit der Vorkommen an seltenen Erden und sei aus diesem Grund Monopolinhaber. Tatsächlich sind die Vorkommen seltener Erden jedoch auf verschiedene Kontinente und Länder verteilt wie Unterabschnitt 4.1.2 aufzeigt. Der Abbau seltener Erden allein in Abhängigkeit der Vorkommen ist vielerorts möglich und nicht auf China beschränkt. Die Bereiche, in denen China tatsächlich über Monopolmacht verfügt, sind die der Produktion und Weiterverarbeitung. Abbau, Aufbereitung, Trennung und Herstellung von Metallen und Magneten finden in China statt. Es befinden sich alle Herstellungsprozesse im gleichen Land, während Australien beispielsweise Vorprodukte nach Malaysia zur Weiterverarbeitung exportiert. Jährlich produziert China etwa 90 Prozent der Gesamtmenge an seltenen Erden. In den letzten Jahrzehnten hat China die Raffinerie- sowie die Produktionskapazitäten deutlich ausgebaut. Auch wenn China der Technologieentwicklung und dem Fachwissen auf diesem Gebiet lange den USA nachstand, war das Interesse auf diesem Wissensgebiet stets sehr hoch. Durch einen Studierendenanteil von etwa 50 Prozent chinesischer Bürger/innen an einschlägigen Einrichtungen in den USA konnte inzwischen viel Wissen in das Land geholt werden. Auf diese Weise konnte China die am weitesten integrierte Wertschöpfungskette für Komponenten wie Permanentmagnete aufbauen. Darüberhinaus verfügt China momentan als einziges Land über die Kapazität, schwere seltene Erden zu verarbeiten. Auch wenn andere Länder in der Lage sind, schwere seltene Erden abzubauen, müssen sie diese nach China transportieren und dort verarbeiten lassen (Hurst, 2010, S. 6; Baldi et al., 2014, S. 54; Smith Stegen, 2014, S. 1-3; Schlör et al., 2017, S. 986).

Neben den großen Vorkommen seltener Erden in China gibt es einen weiteren wichtigen Grund, warum China die Marktmacht in diesem Bereich erlangt hat. Bis in die Mitte der Achtzigerjahre produzierte die kalifornische Mine *Mountain Pass* etwa 60 Prozent des weltweiten Bedarfs. Aufgrund von Umweltbe-

eintrüchtigungen²⁹ sowie verminderter Wettbewerbsfähigkeit durch niedrigere Preise aus China wurde die Mine 2002 geschlossen. Chinas Marktführung ist auf deutlich geringere Produktionskosten zurückzuführen. Durch weniger strenge bzw. kaum existente Umweltschutzgesetze und Sicherheitsmaßnahmen³⁰ sowie günstige Arbeitskräfte konnte China seltene Metalle zu deutlich niedrigeren Preisen als seine Konkurrenten aus anderen Ländern anbieten (Smith Stegen, 2014, S. 4).

4.2.2 Preisentwicklung

China als Hauptlieferant seltener Erden beeinflusste deren Preisentwicklung in den letzten Jahrzehnten maßgeblich. Ursprünglich, bis Anfang der Neunzigerjahre, wurden seltene Erden größtenteils in der westlichen Welt abgebaut. Zu den Lieferanten gehörten vor allem die USA sowie Australien. Dann erkannte die chinesische Regierung das Potenzial dieses Marktes und den strategischen Wert der eigenen Reserven. Als China mit dem staatlich stark geförderten Abbau begann, wurde der Markt mit chinesischen Metallen geflutet. Viele der anderen Produzenten konnten der neuen Preisstruktur nicht standhalten und schlossen ihre Minen (Raman, 2013, S. 174-175).

Bis zum Ende des letzten Jahrzehnts gab es auf dem von China dominierten Markt der seltenen Erden keine großen Schwankungen, doch dann kam es zu deutlichen Preiserhöhungen und reduzierten Produktionsmengen seitens Chinas. Zuvor war China als verlässlicher Lieferant seltener Erden bekannt und die Monopolsituation wurde als nicht ausreichend kritisch betrachtet. Doch Ende der Zweitausenderjahre begann China damit, die jährlichen Exportraten seltener Erden und damit verbundener Produkte erheblich zu reduzieren. Hieraus entwickelten sich drastische Preisanstiege und Importeure weltweit waren den Lieferengpässen ausgesetzt. China begründete sein Handeln auf verschiedene Weise. Zum einen erklärte die Regierung erhöhten Eigenbedarf als Grund für die beschränkten Exporte. Zum anderen sollte illegale Produktion eingedämmt und die Umwelt geschützt werden, um hierdurch eine bessere Kontrolle über die gesamten Produktionsabläufe zu gewinnen. Auch die erhöhte Nachfrage nach seltenen Erden und die damit verbundenen Preisanstiege waren Grund für die Exportrestriktionen. China versuchte, mehr produzierende Industrie ins Land zu locken. Zuletzt wurden auch Verstaatlichungen sowie Zusammenführungen der seltene Erden abbauenden und produzierenden Industrie vorgenommen, wodurch es Ende 2014 nur noch sechs große Unternehmen im Staatseigentum gab (Smith Stegen, 2014, S. 4; Rabe et al., 2017, S. 395).

Die Exportbeschränkungen seitens der chinesischen Regierung führten ebenso zu enormen Preisanstiegen für Neodym. Ein Kilogramm Neodym kostete im Jahr 2005 noch 11 USD, während es im Jahr 2011

²⁹ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.1.3

³⁰ Unter die Umweltschutzgesetze und Sicherheitsmaßnahmen fallen die umweltgerechte Entsorgung der Beiprodukte sowie vor allem der korrekte Umgang mit radioaktiven Stoffen (Smith Stegen, 2014, S. 5).

nach einem sprunghaften Anstieg bereits 286 USD pro Kilogramm waren. Dies entspricht einem Anstieg von 260 Prozent. Nach dieser rasanten Preiserhöhung beruhigte sich die Marktsituation nach einigen Jahren wieder und 2014 sanken die Preise auf 66 USD pro Kilogramm. Aufgrund der Auseinandersetzungen mit der *World Trade Organization*³¹, die zuvor durch eine Klage der Industrieländer Japan, den USA sowie der EU initiiert wurden, senkte China in Folge der Kostenexplosion nicht nur die Preise seltener Erden, sondern erhöhte 2015 auch die Exportraten (Rabe et al., 2017, S. 395).

4.2.3 Maßnahmen anderer Länder zur Minderung der Importabhängigkeit von China

Die Seltenheit bzw. die Mengeneinschränkungen seltener Erden aufgrund von Chinas Marktmacht kann aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden. Ausgehend von der Verwendung dieser speziellen Metalle ist die Unternehmensperspektive naheliegend, da die Wirtschaft an erster Stelle mit der Ressourcenknappheit umgehen muss. Für die Hersteller der von seltenen Erden abhängigen Produkte (beispielsweise Elektromotoren, Batterien oder Windkraftgeneratoren) hängt der finanzielle Erfolg von der Zulieferung bestimmter Metalle ab. Die Lieferrisiken können dabei entweder von

- historisch bedingten Preisschwankungen,
- geopolitischen sowie Beschaffungsrisiken,
- Nachfragerisiken,
- leichter oder schwerer Substitution durch andere Ressourcen,
- Produktionsrisiken oder
- der tatsächlich begrenzten Verfügbarkeit bestimmter Ressourcen

abhängig sein. Um potenzielle Importschwierigkeiten abzuschwächen, entwickelten Hersteller eigene Gegenmaßnahmen und investierten vor allem in Forschung bezüglich Recycling und effizienterem Materialeinsatz (Eggert, 2017, S. 3).

Aus nationaler oder multinationaler Sicht wird die Knappheit seltener Erden etwas anders bewertet. Der Fokus der Besorgnis liegt hier auf der möglichen Verletzbarkeit ganzer Industriebereiche hinsichtlich der Lieferungsengpässe. Die EU nennt hierzu aus der Sichtweise der verarbeitenden Industrie zwei Ebenen der Bedrohung:

- Lieferrisiken, abhängig von der Ersetzbarkeit durch andere Materialien, Wiederverwertung nach Ablauf der Lebensdauer bestimmter Produkte sowie Konzentration des Abbaus seltener Erden auf Staaten, in denen schlechte Regierungsführung und Misswirtschaft bestehen und

³¹ Die *World Trade Organization* (WTO) fördert den fairen Handel zwischen ihren Mitgliedsstaaten, indem sie Vereinbarungen verhandelt und Handelshindernisse beseitigt (WTO, 2018).

- die Bedeutung einiger seltener Erden für den europäischen Produktionssektor gemäß dem Brutto-Mehrwert für einen Sektor (Eggert, 2017, S. 4).

Die Europäische Kommission führt alle leichten und schweren seltenen Erden sowie Yttrium und Scandium als kritische Elemente. Der Bericht der Europäischen Kommission in Bezug auf den kritischen Beschaffungszustand einiger rarer Materialien (u.a. seltener Erden) betont die Wichtigkeit dieser Ressourcen. Seien es bis vor einigen Jahren noch das Erdöl und -gas gewesen, um deren Beschaffung man sich sorgte, sei es nun die Verfügbarkeit seltener Erden, welche die Produktion bestimmter Industriezweige bedrohe. Diese Industriezweige bestimmen durch neue Technologien zukünftige Innovationen und die Richtung der Entwicklung, besonders in Bezug auf Elektromotoren und erneuerbare Energien. Neben wirtschaftlichem Wachstum und Arbeitsplätzen wird durch ihre Verwendung der Wohlstand der europäischen Gesellschaft maßgeblich geprägt. Ein weiteres EU-Projekt zur Minderung von Nachteilen aus Importabhängigkeiten von anderen Ländern ist die sogenannte *EU Raw Materials Initiative*. Diese Initiative basiert auf drei Ebenen. An erster Stelle soll eine stabile Grundlage über den Zugang zu bestimmten Ressourcen aus Entwicklungsländern (insbesondere Afrika) geschaffen werden. Darüber hinaus soll die nachhaltige Versorgung aus europäischen Quellen entwickelt und gestärkt werden und weitergehend wird eine Ressourceneffizienz sowie die Wiederverwertung seltener Erden angestrebt. Das ERECON hat die Situation der Lieferengpässe seltener Erden ebenfalls untersucht und kam zu dem Schluss, dass eine sichere Versorgung nur durch den Bau einer nichtchinesischen Mine gesichert werden könnte. Allein eine einzige Mine außerhalb Chinas³² könnte Berechnungen zu Folge den gesamten europäischen Bedarf an seltenen Erden decken. Auch Indien strebt für seinen wachsenden Elektroniksektor und den somit gesteigerten Bedarf an seltenen Erden die Eigenversorgung mit diesen Metallen an. Neben der aktiven Mine sollen weitere Gebiete erforscht und der Abbau erweitert werden (Mukherji & Wright, 13.08.2012; Massari & Ruberti, 2013, S. 36; Europäische Kommission, 2014, S. 7-9; ERECON, 2015, S. 65; Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission, 2017, S. 13).

Die Umweltverträglichkeit des Abbaus seltener Erden (siehe hierzu Unterabschnitt 4.1.3) mit Auswirkungen auf das Ökosystem und die Gesundheit der Menschen stellt ein Problem dar, das in den nächsten 10 bis 50 Jahren eine übergeordnete Rolle spielen wird. Doch derzeit stehen die wirtschaftlichen Interessen im Vordergrund. So übten einige Staaten auch schon mit einer internationalen Anklage Druck auf China aus. Wie im vorherigen Unterabschnitt³³ erwähnt führte die EU zusammen mit Japan und den USA 2012 über die WTO ein Gerichtsverfahren gegen China, da die Länder durch die Exportbeschränkungen Chinas ihre Industrie bedroht sahen. Dies brachte China dazu, die Exportraten 2015 wieder anzuheben (Moffett, 2012; Eggert, 2017, S. 4; Rabe et al., 2017, S. 695).

³² Diese könnte z.B. in den USA, Kanada oder Australien liegen.

³³ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.2.2.

4.3 End-of-Life-Betrachtung

Die allgemeine Trendwende weg von hohem Ressourcenverbrauch und hin zu nachhaltiger Energieerzeugung³⁴ überträgt sich auch auf andere Gebiete. Der Materialbereich ist einer jener Bereiche, der mehr und mehr in das Blickfeld des nachhaltigen Wirtschaftens rückt. Die verbrauchten Materialien in der Industrie nehmen aufgrund der Weiterentwicklung der Technologien und des Bevölkerungswachstums in Menge und Vielzahl stetig zu. Die Industrie verbrauchte 2014 zehn Milliarden Tonnen an Ressourcen für die Produktion. Auch die Varietät der Ressourcen nimmt mit der Hightech-Technologie weiter zu. Während in den Neunzigerjahren nur etwa zwölf Elemente für die Herstellung eines Handys benötigt wurden, werden heute für die Produktion eines Smart Phones mehr als 60 verschiedene Elemente verwendet. Auch in vielen anderen Industriezweigen werden heute weit mehr Materialien benötigt als noch vor einigen Jahren. Besonders die Nachfrage nach bestimmten Metallen, u.a. den seltenen Erden, ist stark angestiegen³⁵. Elemente wie Neodym und Dysprosium werden in erneuerbaren Energiesystemen wie Windkraftanlagen verbaut und für die Herstellung emissionsneutraler³⁶ Elektrofahrzeuge sowie deren Batterien benötigt. Da der Abbau seltener Erden mit vielen Umweltrisiken und einer nicht irrelevanten Menge an Emissionen verbunden ist, stellt sich die Frage zur Nachhaltigkeit dieser Technologien³⁷ sowie der gesamten Wertschöpfungskette. Eine einfache Lösung stellt zunächst ein verringerter Verbrauch seltener Erden vor, wodurch langfristig auch die Produktion vermindert werden würde. Auch Investitionen in den nachhaltigen Abbau seltener Erden stellen eine mögliche Lösung von Lieferengpässen dar. Ein weiterer Ansatz ist ein nachhaltigerer und umweltschonenderer Abbau seltener Erden in alten oder neuen Minen und Lagerstätten. Auch die Wiederverwendung der Materialien würde für eine Eindämmung des Problems sorgen. Die Importabhängigkeit vieler Länder macht das Recyclen von seltenen Erden besonders interessant. Dieses große Interesse am Recycling spiegelt sich auch in den Patentanmeldungen der letzten Jahre wider: Im Bereich des Recyclings seltener Erden nahm die Anmeldung von Patenten außerhalb Chinas rasant zu (Binnemans et al., 2013, S. 1; ERECON, 2015, S. 48; Ashby, 2016, S. 9-10; Nguyen et al., 2018, S. 1143).

Grundsätzlich gibt es zwei technische Optionen, den Abbau neuer seltener Erden zu vermeiden. An diesen Optionen wurde bereits geforscht und sie werden in den folgenden Unterabschnitten vorgestellt. Unterabschnitt 4.3.1 wird den Bereich des Recyclings seltener Erden vorstellen und Unterabschnitt 4.3.2 wird die Nutzung von möglichen Substituten näher beleuchten.

³⁴ Siehe hierzu Kapitel 3.

³⁵ Siehe hierzu Abschnitt 4.1.

³⁶ Hiermit sind Fahrzeuge gemeint, die in Bezug auf ihren Betrieb emissionsneutral sind.

³⁷ Siehe zu diesem Thema Kapitel 2 und Unterabschnitt 4.1.3.

4.3.1 Recycling

Weltweit steigt die Nachfrage nach seltenen Erden für die Produktion bestimmter Technologien. Der Zugang zu seltenen Erden ist begrenzt oder durch Exportmacht eingeschränkt. Daher bietet das Recycling seltener Erden für viele Länder eine sichere Möglichkeit, an die gewünschten Metalle zu gelangen. Neben der Industrie engagieren sich auch Länder und ihre Regierungen für mögliche Alternativen zu seltenen Erden oder deren verbesserten Einsatz. In den USA wurde das *Critical Materials Institute*³⁸ mit der Aufgabe betraut, in einem fünfjährigen Projekt nach sicheren Lieferkreisläufen seltener Erden und anderen raren Ressourcen zu forschen. Für diesen Zeitraum wurde ein Finanzbudget in Höhe von 120 Millionen USD zur Verfügung gestellt. An diesem hohen Betrag ist die Wichtigkeit der Forschung ablesbar. Auch in Belgien wird bereits seit einigen Jahren an dem Recycling von Metallen geforscht. Zunächst entwickelten die Wissenschaftler ein Recyclingprogramm für Batterien aus Nickel-Metallhydriden und inzwischen forschen sie an einem Recyclingprozess für seltene Erden. Es ist geplant, diese in ein hochwertiges Konzentrat zu verwandeln, das in einer französischen Anlage wieder getrennt werden könnte, um die seltenen Erden separat abschöpfen zu können. In der EU gibt es ein Projekt zur Wiederverwendung der Permanentmagnete in Elektromotoren. Daran forscht, finanziert von dem deutschen Bundesforschungsministerium, derzeit ein Konsortium unter der Leitung der *Siemens AG*. An einem ähnlichen Projekt arbeiten in Japan die Unternehmen *Honda* und *Japan Metals & Chemicals* zusammen. Ihr Ziel ist es, Nickelmetallhydrid-Batterien zu recyceln und hieraus 80 Prozent an seltenen Erden zurückgewinnen zu können. *Hitachi*, als weiteres japanisches Unternehmen, entwickelt Methoden, um Seltene-Erden-Magnete aus Festplatten, Klimaanlage und anderen Arten von Kompressoren zurückzugewinnen (Binnemans et al., 2013, S. 1; Van Gosen et al., 2017, S. 5).

Insgesamt wurde bisher weniger als ein Prozent der verwendeten seltenen Erden recycelt, da deren Sammlung wenig effizient ist. Noch fehlen Technologien oder sind noch nicht zur Genüge ausgearbeitet, doch das größte Problem stellt der fehlende Anreiz dar. Zudem entsteht beim Recyceln ein weiteres, das sogenannte Balance-Problem. Dieses besteht in der Annahme, dass sich Angebot und Nachfrage zu jedem Zeitpunkt entsprechen müssen, da sich andernfalls Engpässe oder Überschüsse bestimmter Elemente ergeben. Auch bei der Produktion entstehende Abfallprodukte³⁹ können durch das Recycling vermieden werden. Während der Produktion seltener Erden werden außerdem viele weitere Elemente freigesetzt. Neodym kommt z.B. seltener vor als die beim Abbau entstehenden Abfallprodukte Lanthan und Cerium. Da auch diese Beiprodukte verkauft werden müssen, streben besonders chinesische Produzenten ein erfolgreiches und effizientes Recycling von Neodym an (Binnemans et al., 2013, S. 1-4).

³⁸ Das *Critical Materials Institute* (CMI) ist eine Partnerschaft aus der Wissenschaft, der US-Regierung und der Industrie (CMI, 2018).

³⁹ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.1.2.

Für das Recycling seltener Erden ist die Entwicklung effizienter, vollintegrierter Recyclingabläufe von hoher Relevanz, um die Versorgungssicherheit herstellen und natürliche Ressourcen effizienter einsetzen zu können. Hierfür ist in erster Linie eine gut durchdachte Recyclingroute erforderlich, die gegenüber dem Abbau seltener Erden viele Vorteile bringen würde. Hierzu gehören ein geringerer negativer Einfluss auf das Ökosystem, in dem der Bergbau stattfindet, kürzere Durchlaufzeiten sowie günstigere Quellen für das Endmaterial. So wird auch die Freisetzung radioaktiver Stoffe vermieden, die beim Abbau auftreten würde. Um dies zu erreichen, wurden bereits mehrere Konzepte entwickelt. Ein Begriff, der sich im Bereich des Recyclings von seltenen Erden etabliert hat, ist der des *Technospheric Minings*. Hierbei sollen die nur unter großem Aufwand produzierbaren Rohstoffe in einen möglichst effizienten und nachhaltigen Recyclingkreislauf eingebracht werden. Dies geschieht in den folgenden Schritten:

1. direktes Recycling von Rückständen seltener Erden aus der Vorproduktphase,
2. *Urban Mining*,
3. Bildung von Deponien an städtischem und industriellem Abfall, der seltene Erden enthält (Binnemans et al., 2013, S. 1-4; ERECON, 2015, S. 48).

Das Grundschema eines vollintegrierten Recyclingprozesses seltener Erde ist in Abbildung 8 dargestellt. Zunächst wird der Abbau seltener Erden auf einer umweltverträglichen Basis stattfinden, die durch Handels- und Investitionspolitik vorgegeben wird. Hiermit wird für jedes mögliche Einsatzgebiet der Metalle analysiert, ob Alternativrohstoffe oder Substitute möglich sind. Im Anschluss folgt die Rohstoffaufbereitung oder das *Technospheric Mining*. In diese beiden Prozesse führen industrielle Endverbraucher und Konsumenten diejenigen Produkte ein, deren Nutzungsdauer abgelaufen ist (Binnemans et al., 2013, S. 4).

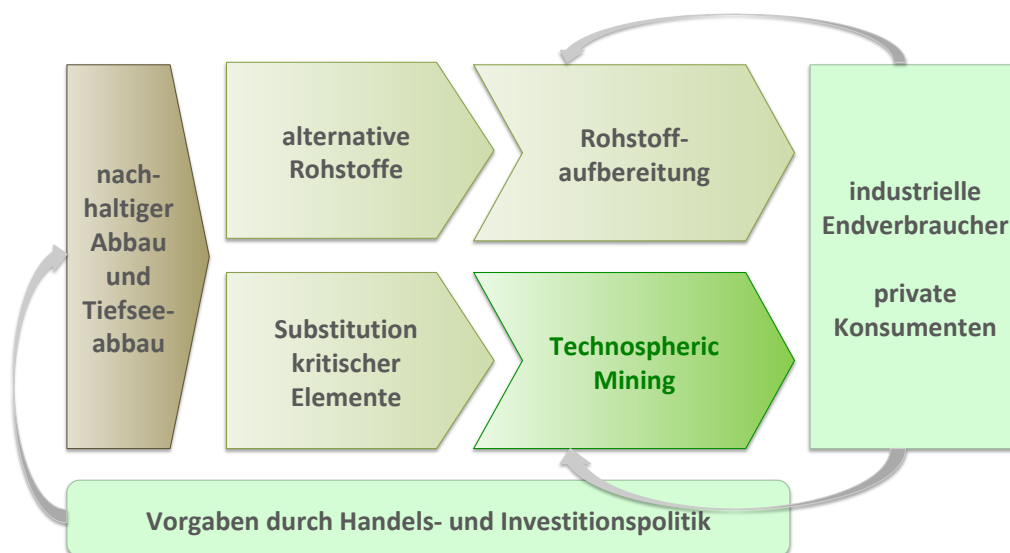


Abbildung 8: Recyclingprozess seltener Erden (in Anlehnung an Binnemans et al., 2013, S. 4)

Das Einsammeln von Endprodukten, die ihr Lebensende erreicht haben, bei den Konsumenten nennt sich *Urban Mining*. Der große Vorteil liegt darin, dass für die wiederverwertbaren Rohstoffe kein neuer Abbau stattfinden muss und neben der Umweltschonung auch kein radioaktives Thorium freigegeben wird. Durch den vermiedenen Abbau muss kein erneuter Aufwand und somit keine zusätzliche Energie für die Freilegung und Beschaffung des eigentlichen Elements eingebracht werden. Am Beispiel von Batterien lässt sich dies aufzeigen. Jährlich werden viele hunderttausend Tonnen an Batterien verkauft, wodurch eine *urbane Mine* für die Verwertung und Rückgewinnung und damit im Vergleich zur ursprünglichen Produktion auch Kostenvorteile entstehen. Durch das Recyceln von Elektromüll können das Abfallvolumen verringert, Batteriebestandteile getrennt und wertvolle, seltene Metalle angereichert werden. Außerdem wird die Gefahr gemindert, dass Abfälle in das Ökosystem gelangen. Rein wissenschaftlich betrachtet lassen sich seltene Erden zu nahezu 100 Prozent aus Endprodukten wiedergewinnen. Dabei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass noch keine Recyclingtechnologien existieren, die relevante Mengen bei Erreichen einer solchen Wiederaufbereitungsrate erbringen können (Larcher & Tarascon, 2014, S. 26; Dutta et al., 2016, S. 189).

Ein weiterer Recyclingansatz beschäftigt sich mit der Wiedergewinnung seltener Erden aus den wichtigsten Rückständen aus Industrieprozessen. Dazu gehören Rückstände aus der Metallproduktion wie Phosphorgips, Bauxite, Abfallprodukte aus Minen, metallurgische Schlacke sowie weitere Rückstände aus Wärmebehandlungsprozessen. Auch aus Abwasser können seltene Erden gefiltert werden. Obwohl die Ausschöpfungsrate aus Industrierückständen mit weniger als einem Prozent sehr gering ist, kann sich diese Art des Recyclings lohnen, da große Mengen an Abfällen aus Industrieprozessen anfallen (Binnemans et al., 2015, S. 18).

Zurzeit lässt sich noch keine durchweg positive Bilanz aus Recyclingprozessen seltener Erden ziehen. Auch wenn in diesem Bereich intensiv geforscht wird und es bereits verschiedene Technologien zur Wiedergewinnung bestimmter Metalle gibt, liegt die Wiederaufbereitungsrate weltweit bei unter einem Prozent. Dies liegt vor allem daran, dass gerade das Ausmaß des *Urban Minings* noch nicht zur Gänze geklärt wurde und nicht genau beziffert wurde, wie viel Material aus Endprodukten tatsächlich zurückgewonnen werden kann. Zudem würde auch ein perfekt funktionierender globaler Recyclingprozess die weiter stark steigende Nachfrage nach seltenen Erden nicht decken können (ERECON, 2015, S. 48).

4.3.2 Nutzung von Substituten

Wie bereits in Abschnitt 4.1 angesprochen, sind seltene Erden für bestimmte Technologien, gerade aus dem Bereich der erneuerbaren Energien, von zentraler Bedeutung für deren effiziente Funktionsweise.

Das Versorgungsrisiko mit diesen Metallen⁴⁰ kann durch Effizienzsteigerung und Recycling nicht bedeutend verringert werden. Neben dem Recycling von Rohstoffen bleibt daher der Bereich der Erforschung und Entwicklung von alternativen Materialien, die vor allem über eine niedrigere Umweltbelastung in der Produktion verfügen, von großer Bedeutung. Kritische seltene Erden könnten auf diese Weise durch weniger kritische Metalle ersetzt werden (Binnemans et al., 2013, S. 5; Degreif et al., 2017, S. 9).

Die Substitution von Stoffen kann in folgende Formen unterschieden werden: die Materials substitution, bei der nur ein einziger Werkstoff ausgetauscht wird, sowie die funktionale Substitution, bei welcher komplett neue Faktorkombinationen eingesetzt werden. Ähnliches gilt für die Technologiesubstitution, bei der eine ganze Technologie und Funktionsweise durch eine andere ersetzt wird. Die drei genannten Arten der Substitution sind Formen der Qualitätssubstitution, durch welche in verschiedenen Graden die technische, ökologische oder wirtschaftliche Leistung beeinflusst wird. Ob und wie ein seltenes Metall in der Anwendung ersetzt werden kann, ist von seinem Einsatzgebiet abhängig. Während sich seltene Erden in Katalysatoren, Keramiken, Glas und Phosphorbeleuchtung nicht ersetzen lassen, ist die Substitution von Permanentmagneten technisch möglich. Darüber hinaus gibt es andere Magnete, die ähnliche Eigenschaften aufweisen und auch in der Produktion und im Verkauf deutlich günstiger als Neodym oder Dysprosium basierte Magnete sind. Dass sie noch nicht flächendeckend eingesetzt werden, ist in ihrer geringeren Leistungsfähigkeit begründet. Zwar ist es möglich, Permanentmagnete mit sehr hoher Leistung ohne seltene Erden herzustellen, doch sind diese wiederum so teuer, dass sich ihre Produktion nicht lohnt. Bei der Substitution seltener Erden in Endprodukten ist abzuwägen, wie wichtig die Funktion und Leistung des Permanentmagnets sind. In kleinen, energieeffizienten Geräten wie Servorobotern und der Unterhaltungselektronik wird der Einsatz seltener Erden unerlässlich bleiben, da eine hohe Dichte der Metalle nötig ist, außerdem werden hier nur geringe Mengen verbaut. Doch in einfacheren, größeren Anlagen könnten Permanentmagnete aus anderen Materialien die Neodym- und Dysprosiummagnete auf lange Sicht ersetzen. Neodym-Eisen-Bor-Magnete enthalten klassischerweise einen bestimmten Anteil an Dysprosium, der die magnetischen Eigenschaften und somit die Effizienz verstärkt. Es ist anzunehmen, dass der Dysprosiumbedarf aufgrund seiner Verwendung in Elektromotoren, Windkraftanlagen und Pedelecs in den nächsten Jahrzehnten besonders stark ansteigen wird. Daher wird die Suche nach Substituten für dieses Element derzeit als sehr relevant erachtet (ERECON, 2015, S. 26; Degreif et al., 2017, S. 10-12).

⁴⁰ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.2.1.

4.4 Verwendung seltener Erden in der Windenergiebranche

Der steigende zukünftige Bedarf an seltenen Erden ist hauptsächlich durch eine hohe Nachfrage nach Permanentmagneten, die aus Neodym-Eisen-Bor-Legierungen bestehen, geprägt. Diese werden vorrangig in Elektroautos und Windturbinen verbaut. Permanentmagnete dieser Art sind die stärksten bisher bekannten Magnete. Das durch sie erzeugte Energieprodukt ist mehr als zwölf mal so hoch wie das unter der Verwendung anderer Permanentmagnete. Auch Dysprosium ist Bestandteil vieler Permanentmagnete. Es ist deutlich teurer als Neodym und wird nur in geringen Mengen verwendet. Weltweit werden 95 Prozent des gewonnenen Dysprosiums zur Herstellung von Permanentmagneten verwendet. Dysprosium sorgt dafür, dass ein Magnet seine Eigenschaften auch bei starker Hitze behält und schützt ihn vor Demagnetisierung. Es wird Neodymmagneten in kleinen Mengen⁴¹ beigemischt. Diese Hitzebeständigkeit ist für Permanentmagnete in Generatoren besonders wichtig, da Windturbinen der Sonneneinstrahlung unmittelbar ausgesetzt sind und sich auch während des Energieerzeugungsprozesses stark erhitzen können. Die Substitution seltener Erden in Turbinen durch weniger hitzebeständige Rohstoffe ist daher wenig sinnvoll (Binnemans et al., 2013, S. 5; Hoenderdaal et al., 2013, S. 344-345; Smith Stegen, 2014, S. 4; Nizhegorodtsev & Ratner, 2016, S. 201; Goodenough et al., 2018, S. 201).

Bei Windkraftanlagen gibt es zwei verschiedene Übertragungssysteme, die mit Getriebe oder getriebeles mit Elektromagnet- oder Permanentmagnet-Generator produziert werden. Die getriebelesen Systeme werden als Direktantrieb bezeichnet und benötigen einen Permanentmagnet, der die Kupferwindungen eines üblichen Generators ersetzt. Wie schwer der eingesetzte Magnet sein muss, hängt von der Generatordrehzahl und von dessen Größe ab. Im Mittelmaß wiegt ein solcher Magnet etwa 700 Kilogramm und beinhaltet knapp 30 Prozent Neodym und meist deutlich weniger als fünf Prozent Dysprosium.

Getriebelesen Turbinen mit einem durch Permanentmagnete erregtem Generator haben viele Vorteile, sie

- sind deutlich leistungstärker,
- benötigen weniger Bauteile,
- sind weniger wartungsintensiv und
- sind weniger verschleißanfällig.

Durch das Wegfallen des Getriebes werden zudem die Größe und das Gewicht der Turbine reduziert. Hieraus resultieren zusätzlich weniger Ausfallzeiten und Wartungsarbeiten. Aufgrund der Verlässlichkeit und eines geringeren Wartungsaufwands werden Direktantriebe besonders häufig offshore genutzt, denn die Wartung von Offshorewindkraftanlagen ist erheblich aufwendiger. Die Windkraftanlagen, die

⁴¹ Dysprosium wird zu 1,4-8,7 Prozent beigemischt.

über ein Getriebe verfügen und für deren Konstruktion somit keine seltenen Erden benötigen werden, brauchen an deren Stelle große Mengen Kupfer⁴² (Moss et al., 2013, S. 562; Habib & Wenzel, 2014, S. 350; Degreif et al., 2017, S. 10; BWE, 2018a, S. 44).

Die getriebelosen Anlagen wurden 2003 in den Markt eingeführt. Ihr Anteil betrug bereits vor vier Jahren 14 Prozent aller neu installierten Windkraftanlagen und nimmt seitdem stark zu. Insgesamt liegt der derzeitige Anteil von Windkraftanlagen mit Direktantrieb bei etwa 27 Prozent. Da die Tendenz der Entwicklung sich auf den Direktantrieb ausrichtet, wird angenommen, dass der Bedarf an Neodym und Dysprosium bis 2030 erheblich steigen wird. In einer US-amerikanischen Studie aus diesem Jahr wurde untersucht, welche Mengen an seltenen Erden eine wieder- oder neueröffnete Mine in den USA produzieren könnte. Gleichzeitig kommen die Forscher/innen zu dem Schluss, dass die Windenergiebranche 4-12 Prozent der gesamten geförderten Menge seltener Erden benötigen wird, um die US-amerikanischen Ziele für ein Wachstum an Windenergie zu erreichen. Eine verbesserte Verfügbarkeit an Neodym würde den Windturbinenherstellern in der Hinsicht mehr Flexibilität geben, dass sie mehr Anlagen mit Direktantrieb produzieren könnten. Dafür sind jedoch auch die US-amerikanischen Hersteller immer noch auf Importe aus China angewiesen (Moss et al., 2013, S. 562; Habib & Wenzel, 2014, S. 350; Streitz, 2018; Imholte et al., 2018, S. 302-303).

Im Folgenden beschreibt Unterabschnitt 4.4.1 wie sich die Preise seltener Erden auf die Kosten von Windkraftanlagen auswirken und Unterabschnitt 4.4.2 erläutert, welchen Umgang große Hersteller mit dem Beschaffungsproblem seltener Erden pflegen.

4.4.1 Beeinflussung der Kosten von Windkraftanlagen

Die Kosten von Windkraftanlagen können grundsätzlich nur schwer eingeschätzt werden, da die Hersteller hierzu keine exakten Zahlen veröffentlichen. Bei der vergleichenden Betrachtung des Baus von Windkraftanlagen mit Direktantrieb und Windkraftanlagen mit Getriebe kann am ehesten auf die Auswirkungen seltener Erden auf deren Kosten eingegangen werden. Direktangetriebenen Anlagen, für die seltene Erden benötigt werden, sind zwar effizienter, jedoch auch etwa zehn Prozent teurer. Wie im vorherigen Unterabschnitt erwähnt, entstehen durch die Verwendung von Permanentmagneten große Vorteile für den Windkraftanlagenbetrieb. Kommt es bei der Verfügbarkeit von Neodym oder Dysprosium zu Engpässen, können diese Folgen für die Effizienz, Verlässlichkeit, Größe und das Gewicht der Anlagen haben. All diese Aspekte stellen Kostenfaktoren dar und somit beeinflussen die Verfügbarkeit und Preise seltener Erden indirekt die Kosten von Windturbinen. Die Kostenwettbewerbsfähigkeit ist

⁴² Ähnlich wie für die Metalle Neodym und Dysprosium verursacht auch der Kupferabbau negative Auswirkungen auf die Umwelt.

auf dem Energiemarkt besonders wichtig. Bisher wurden erneuerbare Energiesysteme oft gerade hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit von herkömmlichen, fossilen Energien verdrängt. Für die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Windenergie ist daher die Liefersicherheit der seltenen Erden relevant (Smith Stegen, 2014, S. 7; Streitz, 2018).

Zwar gibt es noch keine expliziten Studien dazu, inwiefern die Preise seltener Erden direkte Auswirkungen auf die produzierende Industrie erneuerbarer Energien haben. Es gibt jedoch Ansätze dazu wie durch diese Preisentwicklung, vor allem die von Neodym und Dysprosium, der Aktienkurs von Unternehmen aus dieser Branche beeinflusst wird. In einem größeren volkswirtschaftlichen Rahmen wurde mit diesen Ergebnissen belegt, dass die Preise seltener Erden die Aktienkurse alternativer Energien beeinflussen. Die Preise seltener Erden haben somit das Potenzial, die Leistung von Unternehmen im Bereich erneuerbarer Energien einzuschränken und somit auch Investitionen zu verhindern. Untersucht wurden hierbei vor allem die Bereiche Wind- und Solarenergie in Amerika, Europa, dem Mittleren Osten und Afrika sowie Asien und Ozeanien in den Jahren 2006 bis 2011. Die Lieferengpässe von Neodym haben besonders den europäischen Energiemarkt negativ beeinflusst, worunter der gesamte Windenergiesektor litt. Es ist davon auszugehen, dass sich Lieferschwierigkeiten von Neodym und Dysprosium auf die Ziele der EU in Bezug auf den Ausbau erneuerbarer Energien auswirken⁴³ (Baldi et al., 2014, S. 53-54, 60-61).

Die Preise seltener Erden beeinflussen grundsätzlich die Kosten für diejenigen Konsumgüter, in denen sie enthalten sind. In einer weiteren Studie zwischen 2000 und 2015 haben Forscher in multivariaten Modellen den Einfluss der Preise seltener Erden auf die Kosten von Konsumgütern in 60 Ländern untersucht. Folgenden Zusammenhang haben sie anhand der gewonnenen Daten herstellen können: Einen erheblichen Einfluss auf die Preise seltener Erden haben komplexe Lieferketten über Produzent, Logistikunternehmen und Zulieferer sowie Zölle auf Import und Export. Eine weitere wichtige Rolle spielt die monopolistische Marktstellung Chinas, durch welche die Preise seltener Erden höchst unelastisch werden. Hierdurch werden Unternehmen weltweit dazu gebracht, die erhöhten Kosten an die Konsumenten weiterzugeben (Apergis & Apergis, 2017a, S. 5892).

4.4.2 Umgang mit seltenen Erden in Unternehmen

Weltweit werden unterschiedliche Typen von Windkraftanlagen gebaut. Abhängig von der verwendeten Technologie für die Antriebsart oder die Turbine der Anlage entscheidet sich, ob Permanentmagnete, und somit Neodym, zum Einsatz kommen. Einerseits gibt es Hersteller wie *ENERCON*⁴⁴, die bewusst auf

⁴³ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 3.3.2.

⁴⁴ Die *ENERCON GmbH* ist ein deutscher Hersteller von Onshore-Windkraftanlagen mit Sitz in Aurich und einem jährlichen Umsatz von mehr als fünf Milliarden Euro (ENERCON GmbH, 2016b).

die Verwendung seltener Erden verzichten, da sie deren Verwendung als umstritten betrachten und ihre Produktion möglichst umweltschonend ausrichten. Dazu kommen Unternehmen wie *Nordex*⁴⁵, die in letzter Zeit auf andere Antriebstechnologien umgestellt und für neue Anlagemodelle keine Permanentmagnete mehr benötigen. Andererseits gibt es Hersteller, die auf die Technologie des Direktantriebs und somit den Einsatz von Permanentmagneten setzen. Dazu gehören u.a. die Unternehmen *Siemens Gamesa*⁴⁶, *Vestas*⁴⁷, Nummer eins und Nummer zwei auf dem Markt, und *GE Wind Energy*⁴⁸ (WindEnergy Hamburg, 2014; BWE, 2015, S. 38; ENERCON GmbH, 2016a).

Bereits seit über zehn Jahren erstellt Vestas im Zuge seines fortlaufenden Nachhaltigkeitsprogramms individuelle *Life Cycle Assessments* für verschiedene Typen von Windkraftanlagen. Dazu gehört auch die exakte Auflistung aller Materialien, die in einer Turbine verbaut werden. In dieser Auflistung werden auch die seltenen Erden Neodym und Dysprosium benannt, die im Generator sowie im Turm⁴⁹ verbaut werden. Die Produktionsdaten dieser seltenen Elemente werden ebenso angegeben wie deren Herkunft aus Europa oder Asien. Vestas benötigt verhältnismäßig geringe Anteile seltener Erden für seine Turbinentechnologien und lehnt es bisher ab, direktangetriebene Generatoren zu bauen (Garrett & Rønde, 2011, S. 30; Garrett & Rønde 2013, S. 37, 41).

Das US-amerikanische Unternehmen *General Electric*, zu dem auch die Windsparte *GE Wind Energy* gehört, entwickelte in Folge der massiven Preiserhöhungen seltener Erden zwischen 2009 und 2011 eigene Gegenmaßnahmen, um potenzielle Importschwierigkeiten abzuschwächen. Hierzu gehören die Erweiterung der Ressourcenbeschaffungsquellen, die Optimierung des Materialeinsatzes durch verbesserte Herstellungsprozesse sowie die Wiederverwendung knapper Ressourcen und Überarbeitung des Materialeinsatzes und der Systeme sowie die Erforschung und Entwicklung von Substituten (Eggert, 2017, S. 3).

⁴⁵ Die *Nordex SE* ist ein deutscher Hersteller von Windkraftanlagen mit Sitz in Rostock und einem jährlichen Umsatz von mehr als drei Milliarden Euro (Nordex SE, 2013).

⁴⁶ *Siemens Gamesa Renewable Energy SA* ist ein internationaler Hersteller von Windkraftanlagen mit Hauptsitz in Zamudio, Spanien und entstand 2017 durch die Fusion von *Gamesa Corporación Tecnológica S.A.* mit der Windsparte der *Siemens AG* und erwirtschaftete zuletzt einen Umsatz von knapp elf Milliarden Euro (Siemens Gamesa Renewable Energy S.A., 2018).

⁴⁷ *Vestas Wind Systems A/S* ist ein dänischer Hersteller von Windkraftanlagen mit Sitz in Aarhus und einem Umsatz von knapp zehn Milliarden Euro im letzten Jahr (Vestas Wind Systems A/S, 2018).

⁴⁸ *GE Wind Energy* ist eine Sparte des amerikanischen *GE*-Konzerns und produziert Windkraftanlagen. Das Unternehmen hat seinen Sitz in Fairfield, Connecticut und erwirtschaftete zuletzt einen Umsatz von mehr als neun Milliarden USD (GE Renewable Energy, 2018).

⁴⁹ Im Turm werden Permanentmagnete in dünnen Schichten verbaut, um daran Equipment zur Besteigung und Wartung anzubringen. Dadurch kann das Material für ein Leitersystem eingespart werden.

5 Empirische Untersuchung

Um die bereits in den Kapiteln 2 bis 4 dargelegten theoretischen Inhalte in den praktischen Kontext zu stellen, wurde eine empirische Untersuchung durchgeführt. Als Instrument wurde die Methode der qualitativen Interviews gewählt, um gezielt Fachleute aus dem Bereich der Windenergie auf das Thema seltene Erden anzusprechen. Diese Untersuchung eignet sich für die wissenschaftliche Fragestellung besonders gut. In der Fachliteratur liegen verschiedene Meinungen und Ansichten zu dem behandelten Thema vor und daher sind ein Einblick in die Praxis sowie Expertenwissen von erfahrenen Brancheninsidern von besonderem Wert. Es wurden sowohl Personen aus der Forschung als auch Beschäftigte aus relevanten Unternehmen dazu befragt, wie sie den Einfluss der Knappheit seltener Erden auf die Kosten von Windkraftanlagen einschätzen.

Zunächst wird in Abschnitt 5.1 ein Überblick über die verwendete Methodik für die zugrunde liegende empirische Untersuchung gegeben. Darauf folgend wird in Abschnitt 5.2 die spezifische Durchführung der Untersuchung sowie deren Analyse beschrieben und abschließend wird in Abschnitt 5.3 die Auswertung und die Diskussion der Ergebnisse dargestellt.

5.1 Darstellung der Methodik

Die Auswahl für das Untersuchungsinstrument fiel auf eine qualitative Methode, da es sich um eine sehr spezifische Fragestellung handelt, für deren Beantwortung eng eingegrenztes Fachwissen notwendig ist. Die daraufhin folgende qualitative Inhaltsanalyse bezeichnet die Gewinnung von Material aus einer beliebigen Art von Kommunikation. Zunächst muss für die Durchführung festgelegt werden, wie diejenigen Personen definiert werden, die zu dem Thema der Arbeit befragt werden sollen. In der Fachliteratur werden Expert/innen als Personen beschrieben, die über ein spezielles Wissen zu einem bestimmten Fachgebiet verfügen. Da diese Definition auch ein breites Spektrum an Laien miteinschließen würde, muss der Begriff weiter gefasst werden. Im Zuge der Experteninterviews wird den Befragten das Expertensein nicht als personale Eigenschaft oder Fähigkeit, sondern als Zuschreibung aufgrund ihres speziellen Forschungsinteresses zuerkannt. Expert/innen besitzen außerdem eine erhöhte soziale Position aufgrund ihrer Forschung oder Tätigkeit, die durch die Anerkennung der Gesellschaft als solche konstruiert wird. Das abgefragte Expertenwissen ist von großem Interesse, da Expert/innen durch ihre Handlungsorientierungen, ihr Wissen und ihre Einschätzungen wiederum andere Akteure auf dem Gebiet maßgeblich beeinflussen. Dieses Wissen ist der Praxis besonders nah und hat somit Auswirkungen

auf das Handeln anderer Akteure (Gläser & Laudel, 2004, S. 10; Bogner et al., 2014, S. 11-15; Mayring 2015, S. 11).

In der hier durchgeführten Befragung wird vor allem auf das technische Wissen der Interviewten abgezielt. Damit sind Fakten gemeint, die nicht auf die jeweilige Person bezogen, sondern allgemeingültig sind. Zum einen handelt es sich hierbei um Prozesswissen, das Einblicke in Interaktionen, Beziehungen und Ereignisse ermöglicht und zum anderen um Deutungswissen, das die Interpretationen, Meinungen und Deutungen der Befragten wiedergibt. Aufgrund des Abzielens auf technisches Wissen wurde das Instrument des systematisierenden Experteninterviews ausgewählt. Diese Interviewform ist den informatorischen Interviews zuzuordnen. Hier wird in einem weit gefassten Rahmen Sachwissen von Expert/innen in Bezug auf das Forschungsthema gewonnen. Dazu wird ein Interviewleitfaden konstruiert, der im folgenden Absatz näher beschrieben wird. Daraufhin kann eine qualitative Inhaltsanalyse folgen (Bogner et al., 2014, S. 17-19, 23-25).

Da es sich bei der hier zugrunde liegenden Untersuchung um ein teilstrukturiertes Interview handelt, ist die Konstruktion eines Interviewleitfadens für die Durchführung der Befragungen nötig. Dieser strukturiert nicht nur die Abfolge der Themen, sondern dient auch während des Interviews als Hilfsmittel. Grundsätzlich gilt der Leitfaden jedoch nicht als zwingende Vorgabe für alle Befragungen, sondern gibt vielmehr eine grobe Struktur und Reihenfolge vor. Damit die Interviews vergleichbar werden, müssen in qualitativen Interviews nicht exakt identische Fragen gestellt werden. Oft lassen sich die Interviews nicht perfekt planen, sondern es ergeben sich währenddessen weitere Fragen oder weiterführende Themengebiete. Der Interviewleitfaden, der dieser Untersuchung als Basis dient, ist in vier Themenblöcke gegliedert, die in Abschnitt 5.3 einzeln aufgeführt werden und die schrittweise zur Beantwortung der Forschungsfrage hinführen. Während die einleitenden Fragen der Themenblöcke jeweils allgemein verfasst wurden, wurden darauf folgend sehr detaillierte Fragen gestellt. Es wurde nicht antizipiert, dass alle Fragen zur Gänze beantwortet würden, vielmehr sollte der detaillierte Leitfaden das Thema und die Forschungsfrage möglichst vollumfänglich erfassen. Der Interviewleitfaden in deutscher und englischer Ausführung findet sich im Anhang dieser Arbeit (Bogner et al., 2014, S. 27-28; Ebster & Stalzer, 2017, S. 210-211).

Im Anschluss an die Durchführung der Interviews folgt die Auswertung des gesammelten Wissens. Diese Auswertung richtet sich nach den nachfolgenden fünf Schritten. Am Anfang steht die Fragestellung sowie die Materialauswahl, bei der es darum geht, unter welchen Gesichtspunkten die Interviewinhalte ausgewertet werden sollen. Danach wird ein Kategoriensystem aufgebaut, das der Gliederung und Reihung der Inhalte dient. Bei der Extraktion erfolgt im Anschluss die Suche nach gezielten Informationen, die als Basis für die spätere Interpretation dienen können. Daraufhin werden die Daten aufbereitet und Inhalte zusammengefasst, um die Qualität weiter zu verbessern. Abschließend findet die Auswer-

tung statt, die aufgrund der Beantwortung der Forschungsfrage erfolgen kann. Die Auswertung der hier zugrunde liegenden Untersuchung folgt in Abschnitt 5.3 (Bogner et al., 2014, S. 72-75).

5.2 Spezifische Durchführung und deren Analyse

In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, in welcher Art die qualitative Untersuchung durchgeführt wurde. Der Ablauf wird in Anlehnung an die folgenden Schritte beschrieben:

- Bestimmung der Grundgesamtheit,
- Auswahl der Interviewpartner,
- Durchführung der Interviews,
- Verlässlichkeit der Ergebnisse und
- Ebenen der Datenanalyse (Ebster & Stalzer, 2017, S. 225-228).

Bei der Wahl der Interviewpartner wurde ein besonderes Augenmerk auf deren unterschiedliche Hintergründe gelegt. Aufgrund des Reiseaufwands und der komplexen Suche nach Experten/innen ergab sich eine Anzahl von sieben interviewten Personen. Neben Wissenschaftlern wurden auch Praktiker aus der Windenergiebranche befragt sowie eine Person aus einer Regierungsorganisation. Die vielfältige Auswahl der Fachleute führte zu einem universellen Überblick über die Thematik der Forschungsfrage und bot facettenreiche Einblicke und Sichtweisen.

Aufgrund der angestrebten Vielfalt der Interviewpartner wurden die Experten auf verschiedene Art und Weise ausgewählt. Die Wahl fiel sowohl auf Autoren einschlägiger Fachliteratur als auch auf Praktiker aus der Windenergiebranche. Letztendlich wurden Personen aus Dänemark, Deutschland, Großbritannien, Irland und Österreich befragt. Ein wichtiger Aspekt für die Qualifikation zur Befragung waren spezifisches Fachwissen zum Thema der vorliegenden Arbeit sowie langjährige Erfahrung mit dem Thema seltene Erden und/oder Windenergie.

Ausgangspunkt für die Erstellung dieser Arbeit war das Studium der dazu bisher veröffentlichten Fachliteratur. Die Autor/innen besonders interessanter und passender Artikel wurden per Email kontaktiert. Ein Wissenschaftler erklärte sich zu einem persönlichen Interview bereit, ein anderer gab eine schriftliche Stellungnahme zu dem Thema ab. Eine weitere Wissenschaftlerin stand nicht zu einem Interview zur Verfügung und zwei Autorinnen antworteten nicht auf die Anfrage. Während des Besuchs der Fach-

messen *SEAI Energy Show*⁵⁰ und *Hannover Messe*⁵¹ wurden verschiedene Personen aus der Windenergiebranche angesprochen und es ergaben sich dadurch zahlreiche Gespräche. Auf der *SEAI Energy Show* wurden fünf Gespräche geführt, die aufgrund der Messesituation und der damit verbundenen Spontaneität nicht aufgezeichnet werden konnten. Eine der Personen beantwortete den Interviewleitfaden jedoch im Nachhinein schriftlich, wodurch die Inhalte des Gesprächs festgehalten werden konnten. Grundsätzlich verschaffte der Messebesuch einen guten ersten Überblick über die Situation seltener Erden im Bereich der erneuerbaren Energien. Auf der *Hannover Messe* fanden sechs kürzere und vier längere Gespräche statt, durch die Kontakte zum *Bundesverband WindEnergie*⁵² und zu einem der weltweit größten Windturbinenhersteller aufgebaut wurden. Einige Wochen darauf ergab sich ein persönliches Gespräch mit einem Mitarbeiter des *BWE* sowie ein persönliches Gespräch mit dem Geschäftsführer der Windsparte des Unternehmens in Wien. Durch den Kontakt beim *BWE* ergaben sich zwei zusätzliche Interviews mit Experten aus dem Bereich der Windenergie, die jeweils zuvor bei großen Herstellern in der Entwicklung von Generatoren gearbeitet haben und mittlerweile ein Beratungs- und Ingenieurbüro führen. Der Kontakt zu den Interviewten war stets freundlich und hilfreich. Mit Ausnahme eines Forschers und dem Mitarbeiter des *BWE* wollten alle befragten Personen ihre Anonymität wahren. Bei allen Personen durfte das Interview aufgezeichnet oder direkt mitgeschrieben werden. Nur ein Interviewpartner verweigerte in einem persönlichen Gespräch die Tonbandaufzeichnung und bat darum, dass lediglich Notizen zum Gesagten gemacht werden.

In den Gesprächen zeigte sich, dass alle Experten spezifische Informationen zu den gestellten Fragen geben konnten. Es stellte sich früh heraus, dass einige Interviewpartner durch die Fülle sowie den Detailgrad des Interviewleitfadens verunsichert waren, ob sie in der Lage wären, nützliche Antworten zu geben. Aus diesem Grund wurde dem Interviewleitfaden einleitend ein Zusatz beigefügt, der hervorhebt, dass die detaillierte Beantwortung aller Fragen nicht notwendig ist, um wertvolle Informationen zu gewinnen. Während der Durchführung der Gespräche ergaben sich meist spezifische oder fachliche Richtungen. So wurde auf einige Themen sehr detailliert eingegangen, während andere nur ansatzweise besprochen wurden. Durch diese offene Gesprächsführung konnten viele interessante Zusatzinformationen gewonnen werden. In Bezug auf die Validität und die Reliabilität kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse der Experteninterviews auch durch eine/n beliebige/n andere/n Forscher/in zu einem beliebigen Zeitpunkt erzielt werden könnten (Ebster & Stalzer, 2017, S. 227-228).

⁵⁰ Die *SEAI Energy Show* ist eine Fachmesse, die jährlich in Dublin stattfindet und auf der nationale sowie internationale Unternehmen aus der Branche der erneuerbaren Energien ihre Produkte und Dienstleistungen vorstellen (*SEAI Energy Show*, 2018).

⁵¹ Die *Hannover Messe* ist die bedeutendste Industriemesse weltweit. 2018 präsentierten mehr als 5.000 Aussteller ihre Produkte und Dienstleistungen aus verschiedensten Industrien, darunter auch ein eigener Bereich zu den erneuerbaren Energien. Die *Hannover Messe* zählte dieses Jahr über 200.000 Besucher/innen (*Hannover Messe*, 2018).

⁵² Der *Bundesverband WindEnergie (BWE)* wurde 1996 gegründet, um die Energiewende maßgeblich voranzutreiben und die Windenergie in Deutschland auszubauen. Der Verband hat über 20.000 Mitglieder (*BWE*, 2018b).

Als letzter Teil der Untersuchung folgt die Datenanalyse. Das eingesetzte Erhebungsinstrument ist das Experteninterview, weshalb das Hauptaugenmerk der Datenanalyse auf dem explorativen Verfahren liegt. Die gesammelten Informationen werden untereinander sowie mit der Theorie und den aufgestellten Hypothesen verglichen. Dabei ist auch das Entstehen neuer Hypothesen und Denkansätze möglich. Die Transkriptionen der Interviews sind unterschiedlich lang und die Antworten der Experten weisen verschiedene Detailgrade auf. Dennoch können zu allen Themenblöcken bestimmte Antworten zusammengefasst und miteinander verglichen werden (Ebster & Stalzer, 2017, S. 228).

5.3 Ergebnisse und Diskussion der qualitativen Untersuchung

An dieser Stelle werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung diskutiert. Dazu werden die Inhalte aus den Experteninterviews aufbereitet und präsentiert. Für einen leichteren Lesefluss und eine bessere Übersicht werden die befragten Interviewpartner chronologisch nach Durchführungszeitpunkt des Interviews mit IP1 bis IP7 gekennzeichnet. Alle Originaltranskriptionen befinden sich in dieser Reihenfolge im Anhang der Arbeit. Um eine schnellere Überprüfung der Inhalte zu gewährleisten, sind die Zeilen der Transkriptionen durchnummeriert und werden in den folgenden Abschnitten bei Bezug auf ein Interview an Stelle der Seitenzahl angegeben.

Die folgenden Unterabschnitte sind gemäß dem Interviewleitfaden⁵³ nach Themenblöcken geordnet. Die Blöcke zwei bis drei sollen an dieser Stelle näher ausgewertet werden, da die Inhalte aus Block eins bereits mit in Abschnitt 5.2 einfließen. Unterabschnitt 5.3.1 befasst sich mit der Präsenz seltener Erden und in welchem Maße diese fachlich bekannt sind. Danach untersucht Unterabschnitt 5.3.2 den Zusammenhang zwischen seltenen Erden und erneuerbaren Energiesystemen. Unterabschnitt 5.3.3 stellt die Deutung und Interpretation der Befragten zu dem vorangegangenen Themenblock vor und abschließend gibt Unterabschnitt 5.3.4 einen Überblick über die Limitationen sowie offene Fragen. Alle Unterabschnitte basieren auf der gleichen Struktur, die wie folgt aussieht:

1. deskriptive Darstellung der Ergebnisse,
2. Vergleich mit der Theorie,
3. Hypothesenprüfung.

Bevor auf die genannten Themenblöcke im Detail eingegangen wird, werden in Tabelle 3 alle Ergebnisse übersichtlich dargestellt. Die farbliche Aufteilung der Themen dient einem ersten Überblick aller Resultate. Die Antworten wurden zum Zweck der Übersichtlichkeit stark gekürzt. Die freigelassenen Felder stehen für nicht beantwortete oder nicht gestellte Fragen.

⁵³ Siehe nähere Details hierzu in Abschnitt 5.2.

Themenblock	Frage	IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7
Zuordnung der befragten Person im Bereich der erneuerbaren Energien	Welche Beziehung haben Sie zur Windenergie und in welchem Bereich arbeiten Sie?	Professor an dänischer Universität, Chemiker; Forschung zu Substituten für seltene Erden in Permanent-	Manager für Lieferverträge bei einem der führenden europäischen Windturbinenhersteller	Mitarbeiter beim BWE im Bereich Fachgremien und Technik; Kontakt zur Politik; Vermittler zwischen Betreibern und Herstellern	Maschinenbauingenieur in eigenem Beratungsbüro für Windenergie; ehemals bei großem deutschen Windturbinenhersteller beschäftigt	Forscher an der University of Kent; Forschung zum Einfluss seltener Erden auf Märkte	Elektroingenieur in eigenem Ingenieurbüro für Windturbinen; ehemals bei großem deutschen Windturbinenhersteller beschäftigt	Geschäftsführer Österreich einer der größten Windturbinenhersteller weltweit
	Wie nachhaltig schätzen Sie die Windenergie ein?	-	-	Idealismus schwingt mit; Nachhaltigkeit wird angestrebt, ist in Produktion aber gerade bei Rückgriff auf globale Märkte schwer zu realisieren	-	Nachhaltigkeit wird u.a. von Konsumenten bestimmt	sehr nachhaltig; nach 4-6 Monaten ist Energiebilanz gedeckt	im Prinzip ist die Windenergie grün, aber nicht alle Komponenten sind "grün" bekommen und Kostenersparnisse gehen über Nachhaltigkeit
Präsenz seltener Erden in der Windbranche	Wann haben Sie zum ersten Mal von dem Zusammenhang zwischen seltenen Erden und Windenergie gehört?	-	seit der Tätigkeit beim jetzigen Arbeitgeber	seit der Tätigkeit beim BWE	schon vor 2000	vor einigen Jahren	als die Technik der Direktantriebe aufkam	vor 10 Jahren
	Haben Sie schon mit Kolleg/innen oder Geschäftspartner/innen über seltene Erden gesprochen oder Fachartikel darüber gelesen?	Forschung auf diesem Gebiet zusammen mit anderen Wissenschaftler/innen	Wissen über Onlineartikel und Presse, Gespräche mit Kolleg/innen und Geschäfts-partner/innen	seltene Erden sind beim BWE nur dann Thema, wenn sie in der Presse sind (für fachliche Rückfragen z.B.)	auf Tagungen, wissenschaftliche Artikel	Gespräche mit anderen Wissenschaftlern	seltene Erden sind eher zyklisch Thema; besonders 2011 hat Preisentwicklung viele beunruhigt und war sehr präsent	um 2010 waren seltene Erden ein großes Thema
	Was wissen Sie über die Lebenszyklen, Entwertung und Wiederaufbereitung seltener Erden?	-	sehr wenig	Anlagen sind i.d.R. auf 20 Jahre ausgelegt; Recycling wird frühestens in 15 Jahren Thema sein	Anlagen sind auf 20-30 Jahre ausgelegt; längere Beobachtung notwendig, um Lebensdauer der Magnete zu beurteilen	Recycling findet hauptsächlich in China statt	ursprünglich waren Anlagen auf 20 Jahre ausgelegt - mittlerweile eher auf 30	Design-Lifetime beträgt 20-25 Jahre
Zusammenhang zwischen seltenen Erden und Windenergie	Seit wann beschäftigen Sie sich mit dem Thema?	intensiv seit 2014	die letzten fünf Jahre	-	seit Technologie mit Permanentmagneten existiert	seit etwa 2014, bei der Forschung nach Preisschwankungen auf das Thema gestoßen	besonders seit 2011 (Preis Peak in China)	seit Tätigkeit in Windbranche
	Inwiefern beeinflusst die Knappheit/Preisfluktuation seltener Erden die Planung, Herstellung und den Betrieb von Windkraftanlagen?	kaum, denn verhältnismäßig machen die Preise seltener Erden in der Produktion von Windkraftanlagen einen sehr geringen Anteil aus	Planung und Produktion sind weniger betroffen; unbekannte zukünftige Kosten seltener Erden beeinflussen einige Hersteller bei der Konstruktion und Materialbeschaffung	-	sehr, im eigentlichen Betrieb bewusste Entscheidung gegen seltene Erden aufgrund der Kostenproblematik und großer Unsicherheit	das ist wissenschaftlich nicht verifizierbar; seltene Erden beeinflussen das Wirtschaftswachstum und den Energieverbrauch	der Einsatz von seltenen Erden in Windturbinen erhöht deren Leistung deutlich und beeinflusst durch Produktionskosten	seltene Erden sind vor allem auch für das geringere Gewicht von Windturbinen wichtig; welchen Einfluss Preise haben, ist unbekannt
	Wissen Sie woher die seltenen Erden stammen, die in Ihrem Unternehmen/ Bereich verwendet werden?	-	sehr wahrscheinlich China	nein, von keinem Hersteller	vor allem aus China, andere Anbieter sind zu teuer	-	hauptsächlich China	unsicher, evtl. Australien
Bewertung des Einflusses seltener Erden auf die Windkraft	Wie kritisch bewerten Sie den Einfluss seltener Erden auf die Windkraft/Herstellung von Turbinen?	gar nicht kritisch; auch eine Verzehnfachung der Neodympreise würde sich nicht negativ auf Herstellung von Windturbinen auswirken	kritisch; der Einkauf von Windturbinenherstellern wird besonders beeinflusst; negative Umwelteinflüsse seltener Erden werden regelmäßig diskutiert	weniger kritisch; in Deutschland gibt es einige Hersteller, die komplett auf seltene Erden verzichten; gerade im Onshore-Bereich spielen seltene Erden keine Rolle	kritisch bei großen Anlagen; Einsetzen des Permanentmagneten ist sehr komplex	seltene Erden beeinflussen eher CO ₂ -Emissionen	Preise könnten kritischen Einfluss haben	-
	Wo sehen Sie die größten Chancen/ Risiken? (Beschaffung, Recycling, Substitution)	Substitution stellt die größte Chance dar: Substitute sind einfach zu finden	elektrisch erregte Magnete (aus Kupfer/Aluminium) stellen gute Alternativen dar	Recycling wird technisch kein Problem sein	kein Wissen über Recycling; bisher wurden keine guten Substitute gefunden (Energiedichte zu gering)	Recycling ist noch nicht ausgereift; Substitute sind nicht aussichtsreich; Investitionen in neue Minen sind am wichtigsten	Beschaffung läuft reibungslos über chinesische Lieferanten; Neodym ist gut recycelbar; Substitute sind sehr teuer und weniger effizient	kein Wissen über Substitute; zum Recycling gibt es bisher kaum Erfahrung
	In welche Richtung wird die Entwicklung gehen? (Substitute, andere Produktionsstätten, politische Maßnahmen/ Restriktionen, Recycling)	Substitution wird die beste Lösung sein, aber auch Recycling und das Öffnen neuer Minen wird helfen	die Windkraft wird auch weiterhin auf seltene Erden angewiesen sein, diese aber effizienter nutzen; durch das Öffentlichenwerden der Zustände in chinesischen Minen wird der Abbau umwelt-freundlicher werden und andere Minen werden öffnen (z.B. Australien)	grundsätzlich wird die Windbranche zumindest auf mittelfristige Sicht bei Permanentmagneten und somit seltenen Erden bleiben	in Europa wird Einsatz seltener Erden in der Windbranche eher zurückgehen; auf Dauer ist Entwicklung ungewiss; auf lange Sicht werden sich seltene Erden nicht durchsetzen	besonders Europa als größter Importeur muss nach alternativen Quellen seltener Erden suchen	Preisentwicklung bleibt unsicher; Windenergie wird eher keine Probleme haben; Recycling wird sehr wichtig sein und wird schon durchgeführt; Bedarf an seltenen Erden wird massiv ansteigen (besonders für E-Mobilität)	die Industrie wird eine (technische) Lösung dafür finden, welche das ist, wird sich noch herausstellen

Tabelle 3: Komprimierte Darstellung der Ergebnisse

5.3.1 Präsenz seltener Erden

Grundsätzlich ist allen Befragten die Knappheit sowie die Problematik von möglichen Lieferengpässen seltener Erden bekannt. Ohne dieses spezifische Wissen hätten sich die Experten nicht für eine Befragung qualifiziert wie in Abschnitt 5.1 beschrieben ist. Der Grund für die nähere Untersuchung der Präsenz seltener Erden liegt in der Einordnung der Relevanz dieses Themas in Wissenschaft und Praxis. Auch wenn sich alle Experten der Thematik bewusst sind, wird deutlich, dass sie über unterschiedlich fundiertes Wissen verfügen.

Während die Wissenschaftler IP1 und IP5 aufgrund ihrer Forschung über viel Wissen über seltene Erden verfügen, ergaben sich für Praktiker mitunter verschiedene Kontaktpunkte mit diesem Thema. Im Allgemeinen beschäftigten sich die Befragten bereits seit ihrer Tätigkeit in der Windenergiebranche, jedoch spätestens seit 2014 damit. IP2 berichtet, dass er zu Beginn seiner ersten Anstellung bei einem Windturbinenhersteller von dem Einsatz seltener Erden in Permanentmagneten erfahren habe. Für ihn sei dies ein gängiges Thema, über das er sich im Laufe der letzten Jahre im Internet und in Presseartikeln informiert habe, obwohl sein Arbeitgeber keine seltenen Erden verwende (IP2, Z. 7-12). Ähnliches beschreibt IP4, der in seinem Unternehmen nicht mit seltenen Erden arbeitet, deren Entwicklung in den letzten Jahren jedoch sehr wohl verfolgte. Auf Tagungen habe er schon davon gehört und auch Fachartikel dazu gelesen (IP4, Z. 14-18). IP7 berichtet, dass er derzeit keinen detaillierten Überblick über die aktuelle Situation seltener Erden habe, doch dies sei vor etwa zehn Jahren, als der Direktantrieb eingeführt wurde, noch ganz anders gewesen (IP7, Z. 19-22). Zu Zeiten eines steigenden Bedarfs sowie starken Preiserhöhungen habe man sich in der Windenergiebranche viel darüber ausgetauscht. Ähnlich ist auch die Aussage von IP3, der nach eigener Auskunft zwar über ein fundiertes technisches Wissen in dem Bereich der Verwendung seltener Erden in Turbinen verfügt, aber dieses Thema momentan für weniger präsent hält. Aktiv damit auseinandersetzen würde er sich nur dann, wenn Anfragen von der Presse kämen, was jedoch nicht häufig der Fall sei (IP3, Z. 116-122, 139-140). Von den Interviewpartnern aus der Praxis können auch nähere Informationen zu der Herkunft der jeweils verwendeten Erden gewonnen werden. IP4 und IP6 geben an, dass die verwendeten Erden in der Windenergie hauptsächlich aus China kämen, während IP3 über keine Angaben von Herstellern darüber verfügt. IP7 nimmt an, dass die seltenen Erden für sein Unternehmen aus Australien stammten (IP4, Z. 30-31; IP6, Z. 49; IP3, Z. 180; IP7, Z. 96-98).

Die Aussagen der Befragten decken sich mit der Wahrnehmung des Themas in Wissenschaft und Praxis. Personen aus der Windenergiebranche haben bereits von seltenen Erden gehört und sind sehr gut mit deren Entwicklung und Verwendung vertraut. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche wird deutlich, dass das Thema der seltenen Erden im Bereich der erneuerbaren Energien durchaus in Fachartikeln präsent ist und teils sehr genau beschrieben wird. Doch die Anzahl der Artikel, die genau auf

dieses Thema eingeht, ist sehr gering. Zudem handelt es sich um ein sehr neues Forschungsgebiet, da die meisten wissenschaftlichen Artikel aus den letzten ein bis vier Jahren stammen. Auch auf Regierungsebene setzen sich, z.B. europaweit, Organisationen wie das ERECON mit dem Thema seltene Erden auseinander⁵⁴. Hier werden konkret Vorschläge gemacht, wie Lieferengpässe seltener Erden in Zukunft verbessert werden können.

Der nachfolgende Themenblock der Befragung basiert auf der Forschungshypothese, dass die Knappheit seltener Erden und deren Zusammenhang mit Windkraftanlagen in der Branche sowie in der Wissenschaft allgemein bekannt ist. Größtenteils wird diese Aussage durch die Befragung bestätigt. Allen Interviewpartnern ist dieses Thema vertraut und sie können meist aus eigener Erfahrung darüber berichten. Auffallend ist jedoch, dass dieses Wissen bei einigen Befragten eher oberflächlich ist. Gerade bei den Personen, die bei Herstellern von Windkraftanlagen beschäftigt sind, wurde ein detaillierteres Wissen über die Herkunft, Verwendung sowie die Preise seltener Erden erwartet. Besonders über die aktuelle Marktsituation konnte kaum etwas in Erfahrung gebracht werden. Dies könnte zum einen darauf schließen lassen, dass die Marktsituation derzeit entspannt ist und im Gegensatz zu 2011⁵⁵ kein akutes Interesse mehr an dem Thema besteht. Andererseits zeigt dies, dass die seltenen Erden in der Verwendung für Windturbinen nicht als allzu kritisch angesehen werden. IP3 betont z.B., dass nicht alle Hersteller Permanentmagnete verwendeten und wenn sie verwendet würden, nur sehr geringe Mengen an Neodym und Dysprosium dafür benötigt würden (IP3, Z. 55-57). Zudem ist fraglich, wie präsent die Ergebnisse und Vorschläge der ERECON in der aktuellen Politik tatsächlich sind. IP5 äußert, dass er nicht glaube, Organisationen, Unternehmen oder die Menschen im Allgemeinen hätten eine Idee von den Schwierigkeiten, die sich mit dem Abbau und dem Exportmonopol seltener Erden ergeben (IP5, Z. 51-52).

5.3.2 Zusammenhang zwischen seltenen Erden und Windenergie

Nach der Befragung der Experten in Bezug auf die Abhängigkeit der Windenergie von der Knappheit seltener Erden werden verschiedene Sichtweisen deutlich. Einige von ihnen sind der Überzeugung, dass Lieferengpässe und Preisschwankungen seltener Erden einen Einfluss oder erheblichen Einfluss auf die Windenergie haben und andere Experten sind sicher, es gäbe keine nennenswerte Beeinflussung. Je nach Einschätzung ergeben sich auch verschiedene Haltungen gegenüber möglichen Substituten und dem Recycling seltener Erden. Im Folgenden werden die Ergebnisse und Sichtweisen aller sieben Interviews zu diesem Zusammenhang vorgestellt.

⁵⁴ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.2.3.

⁵⁵ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.2.2.

Auswirkungen seltener Erden auf Planung, Produktion und Betrieb von Windkraftanlagen

Einleitend wird bei den Befragungen deutlich, dass sich alle Interviewpartner der aktuellen Bewegung der Energiewende bewusst sind und davon ausgehen, dass besonders die Windkraft in den nächsten Jahrzehnten an Bedeutung gewinnen wird. Durch einen höheren Bedarf an leistungsstarken und effizienten Turbinen wird vermutet, dass auch die Technik des Direktantriebs stärker gefragt sein wird, womit größere Mengen an seltenen Erden benötigt werden (IP5, Z. 10-11). Neben den Herstellern, die Generatoren mit Kupfer- oder Aluminiumwinden, besonders für den Onshore-Bereich, produzieren und auf Permanentmagnete verzichten, gibt es einige Konzerne, die auf die Leistungssteigerung und den geringeren Wartungsaufwand des Direktantriebs setzen und diese Technologie weiter ausbauen (IP3, Z. 169). Wie IP6 erklärt, sei die Leistung einer Windturbine mit Permanentmagnet um drei bis fünf Prozent höher als ohne. Zudem würden solche Anlagen einen deutlich geringeren Verschleiß aufweisen und seien dadurch nicht so wartungsintensiv wie herkömmliche Anlagen, was gerade im Offshore-Bereich einen großen Vorteil böte (IP6, Z. 62-71). Zu diesen Vorteilen merkte IP4 jedoch an, dass auch schon Korrosionsschäden bei direkt angetriebenen Windkraftanlagen beobachtet worden seien und es abzuwarten sei, ob sich die Vorteile dieser Anlagen auch auf lange Sicht bestätigen (IP4, Z. 23-26). Diese Aspekte sind auch aus der Theorie ersichtlich, in der die höhere Effizienz der mit Permanentmagnet betriebenen Anlagen gegenüber klassischer Getriebeanlagen erörtert wird⁵⁶.

Wie zuvor erwähnt, gibt es verschiedene Ansichten zu der Beeinflussung der Windenergie durch seltene Erden. IP4 sieht die Produktion von Windkraftanlagen besonders durch die Preisschwankungen und eine ungewisse Marktentwicklung bedroht. Aufgrund der Unsicherheit, ob und zu welchen Preisen Permanentmagnete zur Verfügung stehen, entschied er sich als Ingenieur für seine Konstruktionen bewusst gegen die Konzipierung von Direktantrieben und somit gegen die Verwendung seltener Erden (IP4, Z. 38-42). Auch IP6, der bereits lange in der Windenergiebranche tätig ist, bestätigt, dass dieser Sektor durch den rasanten Preisanstieg seltener Erden in 2011 stark verunsichert worden sei. Für einen Generator würden mehrere hundert Kilogramm an Neodym benötigt, was sich bei etwa 30 bis 40 Euro pro Kilogramm und einer deutlichen Preiserhöhung bemerkbar mache (IP6, Z. 25-27, 31-33). IP1 dagegen gibt an, dass erneuerbare Energiesysteme in keiner Art und Weise von der Knappheit seltener Erden beeinflusst würden. Selbst eine Verzehnfachung der Preise würde noch keine negativen Folgen haben (IP1, Z. 2-6). Auch IP3 äußert, es seien nach dem starken Preisanstieg von Neodym keine Engpässe bei den (deutschen) Herstellern entstanden, da die Nachfrage nach Permanentmagneten bei den meisten Unternehmen nicht vorhanden gewesen sei (IP3, Z. 186-195). IP7 sagt zwar, dass sein Unternehmen die Produktion gegenwärtig und zukünftig auf direktangetriebene Anlagen auslege, aber ihm keine Details

⁵⁶ Siehe zu diesem Thema Abschnitt 4.4.

zur genauen Entwicklung in Bezug auf die Verwendung seltener Erden bekannt seien (IP7, Z. 53-55).

Die Interviewpartner sind sich in der Hinsicht einig, dass die Planungs- und Herstellungskosten von Windkraftanlagen nicht von allgemeinen Preisschwankungen seltener Erden beeinflusst werden (IP2, Z. 28-32). Dies sei vor allem darauf zurückzuführen, dass die Planung von Anlagen standardisiert ablaufe und somit auch die Kosten konstant blieben (IP3, Z. 203-206). Auch die Beschaffung seltener Erden mache den Unternehmen keine Schwierigkeiten. Laut IP6 gäbe es eine reibungslose Zusammenarbeit zwischen Käufer und Zulieferer, die über professionelle Anbieter in China laufe (IP6, Z. 54-57). IP7 beschreibt ebenfalls, dass die Beschaffung seltener Erden wie jeder andere Einkaufsprozess in Unternehmen ablaufe (IP7, Z. 47-48).

Im Vergleich der gewonnen Ergebnisse mit der Fachliteratur wird die Relevanz seltener Erden für den effizienteren Betrieb von Windkraftanlagen deutlich⁵⁷. Aufgrund der besonderen Eigenschaften von Metallen wie Neodym kann die Leistung des Generators gesteigert werden. Außerdem sind Anlagen mit Direktantrieb grundsätzlich leichter als herkömmliche Anlagen und weniger wartungsintensiv. Die Hypothese, dass seltene Erden die Effizienz von Windkraftanlagen steigern, kann durch die Literatur sowie die Auffassung der Experten bestätigt werden.

Aus Fachartikeln wird deutlich, dass ein Lieferengpass oder eine starke Preiserhöhung seltener Erden insofern einen negativen Einfluss auf die Windenergie haben kann, als die Produktion eingeschränkt wird und somit die zuvor genannten Vorteile nicht mehr genutzt werden können. Durch den Einkauf von Neodym und Dysprosium wird die Produktion der Anlage grundsätzlich um etwa 10 Prozent teurer. Durch eine andere Untersuchung wurde deutlich, dass die Preisentwicklung seltener Erden indirekt einen Einfluss auf die Aktienkurse von Windturbinenherstellern hat. Dem entgegen steht die Aussage von IP1, der den Standpunkt vertritt, dass seltene Erden keinen relevanten Einfluss auf die Kosten erneuerbarer Energiesysteme im allgemeinen haben. Ähnlich antwortet auch IP3, der bisher keinen Einfluss der Preise seltener Erden auf die Windenergiebranche beobachten konnte. Anders sieht es beispielsweise bei IP4 aus, der angibt, sich aufgrund der unsicheren Preis- und Liefersituation seltener Erden bewusst gegen die Verwendung dieser Metalle entschieden zu haben. Die Hypothese, dass Planung, Produktion und Betrieb von Windkraftanlagen durch unvorhersehbare Preisschwankungen sowie mögliche Lieferengpässe seltener Erden negativ beeinflusst werden, wird durch die Literatur und die Untersuchung teilweise bestätigt.

⁵⁷ Siehe zu diesem Thema Abschnitt 4.4.

Recycling und Substitution seltener Erden

Da die größten Vorteile bei der Verwendung von Permanentmagneten in Windkraftanlagen die starke Magnetisierung sowie eine Gewichtseinsparung darstellen, müssten Substitute diese Eigenschaften in annähernd gleichem Maße aufweisen (IP7, Z. 107-109). IP1 forschte bereits zu diesem Thema und bestätigt, dass Substitute für seltene Erden schnell zu finden seien (IP1, Z. 8). In der Praxis gibt es bereits den Ersatz permanent erregter Magnete durch elektrisch erregte Magnete aus den Materialien Kupfer oder Aluminium (IP2, Z. 35-36). Solche Anlagenkonstruktionen könnten laut IP3 genauso effizient und leistungsstark sein wie solche mit Permanentmagnet im Generator (IP3, Z. 260-262). Dass Alternativmaterialien effizient an Stelle von seltenen Erden in Permanentmagneten eingesetzt werden, halten einige der Befragten jedoch für unwahrscheinlich. IP4 sagt, dass bisher keine ausreichend passenden Stoffe gefunden wurden. Seltene Erden erzeugten in Permanentmagneten die höchste Energiedichte, die noch durch keinen anderen Stoff erreicht werden konnte (IP4, Z. 82-83). Hierzu äußert sich IP6 ähnlich: Zwar werde seit 2011 intensiv nach Ersatzstoffen für Magnete gesucht, doch bisher konnte kein Stoff überzeugen. Teilweise würden Permanentmagnete durch Ferritmagnete ersetzt, doch die Magnetfelddichte sei dann um 90 Prozent geringer. Der einzige Vorteil sei die Kostenersparnis, da Eisen deutlich günstiger sei als seltene Erden. Zwar gebe es tatsächlich Elemente wie Kobalt oder Samarium, die im Magnet sehr effizient wirken, doch diese Stoffe seien noch teurer als seltene Erden und derzeit keine echte Alternative (IP6, Z. 74-82).

Das Recycling seltener Erden sehen alle Befragten als wichtige Entwicklung an, befürchten jedoch gleichzeitig, dass zurzeit noch keine sichtbaren Effekte erkennbar sind. IP5 bezeichnet den aktuellen Umsetzungsstand des Recyclings als embryonisch. Daher könne die Wiederaufbereitung seltener Erden der Industrie auch noch keinen Nutzen erbringen. Als weiteren Kritikpunkt nennt er die Konzentration der Forschung an Recycling in China und dem sich dort sammelnden Wissen. Es könne ein neues Monopol entstehen, wobei das Recycling gerade in Import abhängigen Ländern sinnvoll sei (IP5, Z. 185-193). Technisch sei im speziellen das Recyceln von Neodym nicht besonders komplex. Man könne einen benutzten Magnet zerkleinern, zermahlen und pulverisieren. Im Anschluss könne der Magnet neu aufgebaut und erneut magnetisiert werden. In der Praxis werde das auf diese Weise bereits gehandhabt (IP6, Z. 99-101). IP3 erörtert, dass es vielmehr die mangelnde Erfahrung mit dem Recycling sei, an der es derzeit mangle. Die Lebensdauer von Windkraftanlagen sei auf 20 bis 30 Jahre ausgelegt, die Technik des Direktantriebs mit Permanentmagnet existiert noch nicht lange Zeit und sie werde vor allem in Offshore-Anlagen verbaut. Da diese Anlagen voraussichtlich noch mindestens zehn bis 20 Jahre in Betrieb sein würden, werde dem Abbau und dem Recycling der Anlagen bisher noch keine große Aufmerksamkeit geschenkt (IP3, Z. 157-177).

An dem Recycling⁵⁸ und der Substitution⁵⁹ seltener Erden wurde bisher schon in verschiedenen Bereichen, besonders in der Materialwissenschaft, geforscht, was auch bei Sichtung der Literatur auffällt. Auch von Seiten einiger Regierungen wurden große Projekte in Auftrag gegeben, um mögliche Wiederaufbereitungsmethoden und Alternativmaterialien zu erforschen. Zudem gibt es Unternehmen, die bereits intensiv daran arbeiten, seltene Erden effizient recyceln zu können. Dabei handelt es sich zum jetzigen Stand jedoch vorrangig um Prototypen und noch keine massentauglichen Verfahren. Bei dem Vergleich der Perspektiven auf Recycling und Substitution von Wissenschaft und Industrie geht eine Schere zwischen Theorie und Praxis auf. Diese spiegelt sich auch in den Experteninterviews mit Forschern und Praktikern wider. Während IP1 in seiner Forschung den möglichen Ersatz seltener Erden durch andere Stoffe bereits bestätigt hat und Substitute für eine ausreichende Lösung hält, wird in der Praxis deutlich, dass diese noch nicht zum Einsatz kommen. IP6 beobachtet die Entwicklung seltener Erden in der Windenergiebranche schon seit den letzten Jahrzehnten und hat noch von keiner effizienten Methode gehört, die bisher angewendet wurde. Bei dem Recycling sieht es ähnlich aus. Trotz der intensiven Forschung auf diesem Gebiet und hohen Investitionen vieler Staaten und Unternehmen gibt es noch keine etablierten Prozesse der Wiederaufbereitung seltener Erden. Dafür spricht auch, dass IP2, IP4 und IP7 sich zu dem Thema nicht äußern konnten.

Bei der Überprüfung der Hypothesen zu diesem Themenblock wird besonders durch die Befragung der Experten deutlich, dass bisher weder Substitute für noch das Recycling von seltenen Erden effizient und großräumig eingesetzt werden. Zwar legen Wissenschaftler/innen in Fachartikeln nahe, dass beide Prozesse erforscht und möglich seien, doch aus der Praxis wird deutlich, dass die Umsetzung noch viele Jahre der Weiterentwicklung benötigt. Auch wenn es die Methoden in der Theorie gibt, werden seltene Erden in Permanentmagneten bislang nicht durch Substitute ersetzt oder nach Standardverfahren in großen Mengen recycelt.

5.3.3 Deutung und persönliche Einschätzung der Befragten

Neben einer allgemeinen Abfrage nach dem Einfluss seltener Erden auf Windkraftanlagen wurden die Experten nach ihrer persönlichen Einschätzung zu diesem Thema befragt. Dabei sollte auch beleuchtet werden, wie kritisch die Befragten die derzeitige Situation in der Windkraftbranche bzw. bei dem Angebot seltener Erden bewerten. Es wurde auch gefragt, wie die Entwicklung in Richtung von Substituten, anderen Produktionsstätten, politischen Maßnahmen und Recycling eingeschätzt wird. Im Folgenden werden die Ergebnisse nach dem Grad der Kritik der Einschätzung vorgestellt.

⁵⁸ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.3.1.

⁵⁹ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.3.2.

Bei der Bewertung und Zukunftsaussicht gehen die Aussagen der Befragten auseinander. IP5 betrachtet die allgemeine Liefersituation seltener Erden als sehr kritisch und mutmaßt, dass die EU das Problem des chinesischen Monopols⁶⁰ zwar kenne und deswegen das ERECON ins Leben gerufen habe. Doch politisch würde die EU das Thema nicht fokussieren und nicht weiter auflösen (IP5, Z. 41-44). Grundsätzlich geht IP5 davon aus, dass seltene Erden das Wirtschaftswachstum und den weltweiten Energieverbrauch im großen Rahmen beeinflussen. Er vermutet jedoch, dass die Diskussion darüber, ob ein Einfluss bestehe oder nicht, noch mindestens weitere 20 Jahre geführt werde, bevor wirksame Maßnahmen ergriffen würden. Als wichtigen Lösungsansatz für das sehr importabhängige Europa empfiehlt er die Untersuchung von Böden und Gestein, da sich auch auf europäischem Gebiet unentdeckte Abbaugebiete seltener Erden befinden könnten. Grundsätzlich geht IP5 nicht davon aus, dass Restriktionen oder Gesetze auf Regierungsebene eine Lösung darstellen könnten und hält es für empfehlenswert, dass Europa weiterhin intensiv an seltenen Erden forscht (IP5, Z. 132-136, 143-145, 160-161, 177-178).

Auch IP6 sieht den Einfluss seltener Erden auf die Windenergiebranche kritisch und eine weitere Beobachtung der Preisentwicklung von Neodym als sehr wichtig an. Doch eine Preisverdopplung werde noch keinen großen Einfluss haben und momentan sei das Preisniveau eher stabil. Seiner Meinung nach stehe nicht die Windenergiebranche an erster Stelle, was den Verbrauch von seltenen Erden angeht, sondern die Elektromobilität. Hier sieht er aufgrund der derzeitig rasanten Entwicklung eine besonders große Nachfrage nach Metallen wie Neodym und Dysprosium. Die Windenergiebranche werde Statistiken zufolge nur etwa drei Prozent des weltweit abgebauten Neodyms beanspruchen, was anteilmäßig keine große Menge sei. Langfristig geht IP6 jedoch von Preissteigerungen seltener Erden aus und spricht sich für eine bessere Kontrolle des Marktes aus. Das Recycling werde zwar zunehmen, doch China das Recyclingmonopol zu überlassen sei auch keine Lösung, da die Kapazitäten nicht ausreichen würden. *Urban Mining*⁶¹, das Recyceln von Endprodukten wie Handys und Tablets, werde zudem in der Zukunft an Bedeutung gewinnen (IP6, Z. 105-117, 121-133).

IP2 sieht das Abhängigkeitsverhältnis von Windkraftanlagen zu seltenen Erden eher kritisch. Er geht davon aus, dass seltene Erden weiterhin in erneuerbaren Energiesystemen verbaut würden, es jedoch effizientere Technologien geben werde. Dadurch könnten die Metalle ergiebiger genutzt und Material eingespart werden. Außerdem vermutet IP2, dass das Thema seltene Erden in der Öffentlichkeit in Zukunft deutlich präsenter sein werde und die Umweltschäden durch bessere Abbauprozesse eingedämmt werden könnten (IP2, Z. 57-62). Als weniger kritisch betrachtet IP4 die Verwendung seltener Erden in der Windkraft. Er gibt an, die Tendenz der Verwendung werde in Europa eher zurückgehen. Doch langfristig sei ihm die Entwicklung unklar. Auch wenn IP4 äußert, dass es zum jetzigen Zeitpunkt noch

⁶⁰ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.2.1.

⁶¹ Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.3.1.

keine adäquaten Substitute gebe, geht er nicht davon aus, dass sich die seltenen Erden auf lange Sicht durchsetzen werden (IP4, Z. 66-73, 82-86). Da er bisher noch nicht mit Unternehmen, die direktangetriebene Anlagen herstellen, in Kontakt stand, schätzt auch IP3 die Situation eher unkritisch ein. Er sehe den Bedarf nicht und wisse, dass die meisten deutschen Hersteller auf die Verwendung großer Mengen an seltenen Erden verzichten. Die Entwicklung des Recyclings betrachtet er jedoch zuversichtlich: Da Hersteller Komponenten grundsätzlich zurückbauten, sei auch das Wiederverwenden von seltenen Erden denkbar (IP3, Z. 116-130, 311-324).

IP7 bewertet den Einfluss seltener Erden auf Windkraftanlagen als unkritisch und hält eine pragmatische Lösung der Wirtschaft für wahrscheinlich. Bei aufkommenden Problemen sei die Wirtschaft durch Innovation bisher immer in der Lage gewesen, diese zu lösen. Nach einiger Zeit werde sich eine gewisse Professionalität entwickeln, z.B. beim Recycling, und durch die Entwicklung neuer Konzepte werde sich die Abhängigkeit von seltenen Erden erübrigen (IP7, Z. 89-92, 109-111). Abschließend hält IP1 den Einsatz seltener Erden für unkritisch, da diese durch passende Substitute ersetzt werden könnten. Lieferengpässe könnten höchstens kurzfristig entstehen, da China über ein Monopol verfüge, doch langfristig würden außerdem neue Minen eröffnet werden, wodurch sich die Situation entspannen werde (IP1, Z. 8, 15-23).

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansichten zu der zukünftigen Entwicklung seltener Erden und deren Einsatz in der Windenergiebranche. In einer Studie zur Aussicht der Lieferung seltener Erden bis 2020 kamen Wissenschaftler zu der Erkenntnis, dass Neodym relativ zu anderen seltenen Elementen nicht von Lieferengpässen bedroht sein werde, da es zu den leichten seltenen Erden gehöre und auch außerhalb Chinas in vielen Abbaustätten verfügbar sei. Grundsätzlich sind neben den befragten Experten IP1, IP2, IP5 und IP6 viele Forscher/innen überzeugt, dass es dringend notwendig sei, neue Minen außerhalb Chinas, im besten Fall in Europa, zu eröffnen. Als weitere Lösungsansätze zur Vermeidung von Lieferengpässen und Preisschwankungen bieten sich die Substitution von Dysprosium sowie eine effizientere Nutzung seltener Erden an. Auch Recycling wird als mögliche Lösung genannt. Es gibt Einschätzungen, denen zufolge die durchschnittliche Lebenszeit von in Magneten verbautem Neodym nur etwa zehn Jahre betrage. Dies wird noch zu bestätigen sein, doch sicher ist, dass das Recyceln von seltenen Erden nach Meinung der Experten IP1, IP5 und IP6 sowie nach Aussagen einiger wissenschaftlicher Artikel eine wichtige Rolle spielen werde. Es wird jedoch auch betont, dass das Recycling derzeit noch nicht weit genug entwickelt sei, um flächendeckend eingesetzt zu werden. Erst auf mittel- oder langfristige Sicht könne es erfolgreich sein. Dies wird auch deutlich durch die Aussagen der Experten IP2, IP4 und IP7, die bisher noch nicht vom Recycling seltener Erden oder Permanentmagneten gehört haben (Habib & Wenzel, 2014, S. 350, 358; Rollat et al., 2016, S. 434-435).

Die Hypothese, dass Windturbinenhersteller aufgrund der kritischen Liefersituation seltener Erden in Zukunft weniger auf Anlagen mit Permanentmagneten setzen werden, kann weder eindeutig unterstützt, noch vollständig widerlegt werden. Da das Thema in den letzten Jahren neu aufgekommen ist, wird es, wie von Interviewpartnern sowie von der verwendeten Literatur angegeben, weiter zu beobachten sein. IP3 zufolge verzichteten viele Unternehmen grundsätzlich auf seltene Erden und entwickelten ihre Anlagen nach alternativen Technologien. Sie würden Lieferengpässe und Preisschwankungen seltener Erden nicht treffen. Doch entgegen der Aussage von IP4, dass seltene Erden in der Branche bald nicht mehr verwendet würden, berichtete IP7 von der Fokussierung auf eben diese Technologie. Einige der größten Windkraftanlagenhersteller weltweit setzten gezielt auf Permanentmagnete und seien kurz- oder mittelfristig auf seltene Erden angewiesen⁶².

5.3.4 Limitationen und weiterführende Fragen

In den vorherigen Unterabschnitten wurden die Ergebnisse der Untersuchung diskutiert, mit der Literatur abgeglichen und zur Überprüfung der Hypothesen herangezogen. Zwar konnten sowohl aus der Literatur als auch aus den Experteninterviews viele Informationen gewonnen werden, doch einige Aspekte konnten nicht im Detail geklärt werden. Was IP3 im Gespräch schon erwähnte, trifft auf diese Untersuchung zu: Es ist schwierig, die richtigen Ansprechpartner/innen bei den großen Windkraftanlagenherstellern zu finden und an wichtige Informationen zu gelangen (IP3, Z. 298-299). Besonders, um die künftige strategische Ausrichtung in Bezug auf seltene Erden zu erfahren, wären Gespräche mit Experten/innen der Marktführer interessant gewesen. Doch die Unternehmen reagieren sehr zurückhaltend, was die Herausgabe von Strategien, Ausrichtungen und Zahlen angeht.

In Bezug auf die Entwicklung in Europa gab IP4 an, er gehe nicht davon aus, dass sich die seltenen Erden auf Dauer in der Windkraft durchsetzen werden (IP4, Z. 85-86). Zwar spricht dies gegen die Maßnahmen der EU, die das ERECON ins Leben rief und aktiv an dem Thema forschen lässt. Dennoch wäre eine Nachforschung im Bereich der europäischen Strategie erstrebenswert. Genauso wäre eine Betrachtung anderer Kontinente wie Asien und Amerika aufschlussreich für die Untersuchung gewesen. Im Rahmen dieser Arbeit war jedoch keine Befragung außerhalb Europas möglich. Zwei schriftliche Anfragen nach einem Telefoninterview blieben von einer kanadischen Forscherin sowie einem US-amerikanischen Unternehmen unbeantwortet.

Nicht nur während des Besuchs der Fachmessen, sondern auch im Zuge der Interviews wurde das Thema Elektromobilität angesprochen. IP6 betonte, dass er dieses Feld als künftig größten Abnehmer der seltenen Erden sieht (IP6, Z. 107-108, 130-133). In diesem Bereich seien hochqualitative Magnete besonders

⁶² Siehe zu diesem Thema Unterabschnitt 4.4.2.

wichtig. Hersteller seien daher voraussichtlich am meisten von Lieferengpässen oder Preisschwankungen betroffen. Da sich zu Beginn der Untersuchung ein gutes Netzwerk an Experten aus der Windenergiebranche ergeben hat und diese im Detail dargestellt werden sollte, wurde auf eine nähere Analyse der Elektromobilität verzichtet. Für die Zukunft würde sich eine ähnlich ausgerichtete Arbeit über den Einfluss seltener Erden auf die Herstellung von Elektromotoren jedoch empfehlen.

6 Conclusio

In diesem Teil der Arbeit werden die Ergebnisse der Literaturrecherche sowie der empirischen Untersuchung zusammengefasst, Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsperspektiven gegeben. Aus den vorangegangenen fünf Kapiteln wird die allgemeine Sichtweise darauf deutlich, inwiefern Preisschwankungen und Lieferrisiken seltener Erden die Kosten erneuerbarer Energiesysteme, im speziellen Windkraftanlagen, beeinflussen. Die Bedeutung der Windenergie für die globale Energiegewinnung wird durch den drohenden Klimawandel und die voranschreitende Energiewende hergeleitet. Im Folgenden werden in Abschnitt 6.1 die wichtigsten Ergebnisse aus Literatur und Untersuchung zusammengefasst und in Abschnitt 6.2 interpretiert und bewertet.

6.1 Zusammenfassung

Der Klimawandel und die Energiewende führen dazu, dass der Windenergiesektor weltweit immer weiter ausgebaut wird. Für die Technologie der direkt angetriebenen Windkraftanlagen werden Permanentmagnete in den Generatoren benötigt. Die effizientesten dieser Magnete werden aus seltenen Erden, vornehmlich Neodym und Dysprosium, hergestellt. Prognosen besagen, dass die Windenergiebranche 2020 etwa 2,5 Prozent und 2030 vier Prozent des Gesamtbedarfs an seltenen Metallen benötigen wird. Zwar sind erneuerbare Technologien zur Energieerzeugung heute hochentwickelt und günstig, doch bei einer steigenden Relevanz seltener Erden für die Produktion von Permanentmagnet betriebenen Windkraftanlagen nimmt die Abhängigkeit von diesen Metallen deutlich zu. Die Nachfrage nach Neodym könnte sich in kurzer Zeit vervierfachen. Auf den starken Preisanstieg in 2011 reagierten viele Hersteller⁶³, dennoch forcieren die größten Unternehmen weiterhin die Direktantriebstechnologie und verlassen sich somit auf den Markt seltener Erden. Schätzungen zufolge wird der Anteil an direktangetriebenen Windkraftanlagen bis 2030 um 30 bis 40 Prozent steigen (Gielen et al., 2016, S. 119; Streitz, 2018; Hoenderdaal et al., 2013, S. 346).

Im nächsten Jahrzehnt werden seltene Erden voraussichtlich stark gefragt sein. Besonders in Bezug auf Neodym wird abzuwarten sein, ob und wie schnell es gelingt, neue Minen zu öffnen, um den wachsenden Bedarf zu decken. Dies ist die vorerst erfolgversprechendste Maßnahme, um dem nicht einzuschätzenden Agieren Chinas hinsichtlich des Monopols zu begegnen, birgt jedoch auch Nachteile. Die

⁶³ Dazu gehörte auch die *Siemens AG*, die heute als *Siemens Gamesa* Weltmarktführer in der Windkraftanlagenproduktion ist (Sadden, 2011).

Neueröffnung von Minen erfordert einen hohen Aufwand - teilweise herrscht Uneinigkeit über die Güte der Gesteinsreserven und die Weiterverarbeitung müsste weiterhin auf China ausgelagert werden. In Zukunft bleibt es zu beobachten, wie die komplexen Wertschöpfungsketten sowie die prognostizierte Nachfrage an seltenen Erden präziser geklärt werden. Dabei gilt es, bedrohliche Risiken zu identifizieren und einzudämmen. Dazu gehören neben neuen Produktionsstätten außerhalb Chinas auch die Separation der Beiprodukte, das Recycling, die Abfallreduktion und die Substitution. Diese Initiativen werden u.a. von Regierungsorganisationen wie der *EU Raw Material Initiative* vorangetrieben. Das Monopol Chinas auf seltene Erden belastet die Windindustrie insofern, als es sie abhängig von einem einzigen Exporteur dieser Elemente macht. Unerwartete Preisanstiege können die Hersteller von Windkraftanlagen empfindlich treffen, da deren Produktion von der Verfügbarkeit seltener Erden abhängt. Die Lieferrisiken begründen sich durch

- die hohe Wahrscheinlichkeit einer stark ansteigenden Nachfrage nach seltenen Erden;
- die Abwesenheit der Aussicht auf eine schnell auszulagernde Produktion außerhalb Chinas aufgrund des hohen Aufwands und der teilweise fehlenden Reserven sowie der weiteren Abhängigkeit von der chinesischen verarbeitenden Industrie;
- die Marktmacht Chinas, die schwer eingeschätzt werden kann und durch die viele Importländer von einem einzigen Exporteur abhängig werden;
- politische Risiken der Exportländer, die durch politische Instabilität die Versorgung mit seltenen Erden gefährden können;
- bisher nicht hinreichend effizienten Methoden des Recyclings und der Substitution (Moss et al., 2013, S. 559, 563; Smith Stegen, 2014, S. 5; Nizhegorodtsev & Ratner, 2016, S. 202-203).

Die Metalle Neodym und Dysprosium bergen eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass es zu Lieferengpässen kommt. Das ist hauptsächlich begründet in Marktdynamiken sowie politischen Risiken, durch die erhebliche Export- und Preisschwankungen entstehen können. In der Wissenschaft gehen zahlreiche Forscher/innen davon aus, dass das Thema der Lieferengpässe seltener Erden deutlich unterschätzt wird. Zwar ist die chinesische Marktmacht in Bereichen wie der Mineralienindustrie wohl bekannt, doch viele Vertreter/innen aus dem Sektor der erneuerbaren Energien haben wenig Wissen darüber. Daher sollte dieses Thema laut aktuellen Forschungen ernst genommen und durch weitere Initiativen von Seiten der Regierungen und der Wirtschaft fokussiert und vorangebracht werden (Moss et al., 2013, S. 563; Smith Stegen, 2014, S. 2, 5-6).

Die in der Untersuchung befragten Experten bewerten die Abhängigkeit der Windenergiebranche von seltenen Erden und die mögliche Beeinflussung der Kosten unterschiedlich. Während eine Bestätigung der kritischen Liefersituation erwartet wurde, äußerten einige Fachleute, dass sie nicht davon ausgin-

gen, dass seltene Erden ausschlaggebend für die Kosten oder die allgemeine Produktion von Windkraftanlagen seien. Als Hauptgründe dafür wurden der geringe anteilmäßige Bedarf der Windenergie am weltweiten Verbrauch seltener Erden sowie das Ausweichen auf andere Generatortechnologien genannt. Besonders im Onshore-Bereich kommen kaum direktangetriebene Anlagen zum Einsatz, sodass deren Hersteller für die Produktion auch kaum Permanentmagnete benötigen. Insgesamt wurden in den Gesprächen verschiedene Meinungen und Einschätzungen deutlich, die ähnlich wie die Literaturrecherche dazu führen, dass die Forschungsfrage vielschichtig und nicht mit einer einseitigen Aussage sowie aus unterschiedlichen Perspektiven zu beantworten ist.

6.2 Fazit

Am Ende dieser Arbeit sollen die aus der Literatur sowie der Umfrage gewonnenen Ergebnisse Überprüfungen der in Kapitel 1.1 aufgestellten Hypothesen zulassen. Daraufhin folgen ein Ausblick auf zukünftige Perspektiven und ein Fazit.

Die Problematik, die mit der Beschaffung seltener Erden für die Windindustrie verbunden ist, ist allen Befragten bekannt. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Akteure in der Windenergiebranche durchaus mit diesem Thema auseinandersetzen. Trotz der noch jungen Forschung in diesem Bereich ist das Wissen über seltene Erden in Windkraftanlagen präsent in Wissenschaft und Praxis, was die Relevanz des Themas unterstreicht.

Die kosteneffiziente Substitution seltener Erden in Windturbinen scheint derzeit noch nicht möglich. Zwar gab einer der Befragten an, dass Substitute eine erfolgreiche Alternative zur Nutzung seltener Erden in Permanentmagneten seien, doch die Mehrheit der Befragten äußerte, dass Substitute entweder nicht bekannt oder nach dem derzeitigen Forschungsstand noch nicht kosteneffizient einsetzbar seien. In aktuellen Fachartikeln aus der Materialwissenschaft sind Chemiker/innen und Physiker/innen von der Existenz adäquater Substitute überzeugt. Aus wissenschaftlicher Sicht ist deren Herstellung wenig problematisch. Doch aus wirtschaftlicher Perspektive wird dies anders bewertet: In der Praxis kommen Substitute bisher nicht zum Einsatz, da sie nicht über die nötige Leistung verfügen oder nicht kosteneffizient sind. In naher Zukunft stellt die Substitution seltener Erden keine gute Alternative dar. Es ist fraglich, ob zeitnah effizient zu gewinnende und günstige Substitute entdeckt werden.

Auch die Recyclingmethoden, die momentan für seltene Erden existieren, stellen keine umfassende Lösung dar, um deren Liefer- und Preissituation zu entspannen. Neben Substituten existieren auch Recyclingmethoden für seltene Erden. Prinzipiell scheint das Recycling eine vielversprechende Methode zu sein, um den erneuten Abbau seltener Erden sowie deren energieintensive Verarbeitung zu beschränken und nachhaltig Ressourcen wiederzuverwenden. Auch aus wirtschaftlicher Sicht würde das Recycling

zu deutlichen Kosteneinsparungen bei der Beschaffung seltener Erden führen. Bis recyceltes Neodym und Dysprosium in signifikanten Mengen in der Windenergiebranche zum Einsatz kommen, werden allerdings voraussichtlich noch einige Jahrzehnte vergehen, denn bisher sind die Recyclingmethoden nur in der Theorie ausgearbeitet und finden in der Praxis noch keine nennenswerte Anwendung. Besonders das *Urban Mining*, die Gewinnung seltener Erden aus Endprodukten, wird derzeit kaum betrieben und bei den Endkonsumenten zu wenig beworben. Hier muss ein größerer Anreiz entstehen, Geräte nicht regulär zu entsorgen, sondern zu entsprechenden Sammelstellen zu bringen.

Dass die Verwendung seltener Erden die Effizienz und Leistung von Windturbinen erheblich steigert, ist eine notwendige Prämisse, um deren Einsatz zu begründen. Technisch wird dies sowohl in der Literatur als auch von den befragten Personen bestätigt. Durch die Verwendung von Permanentmagneten ist die Konstruktion getriebeloser Anlagen möglich, die gegenüber herkömmlichen Anlagen effizienter in der Leistung, allgemein leistungsfähiger und leichter sind. Auch ein geringerer Materialverbrauch sowie weniger Wartungsaufwand sind Vorteile dieser Technologie. Die Vorteile für die Verwendung seltener Erden in Windkraftanlagen überwiegen, weswegen auch in Zukunft Anlagen mit Direktantrieb gebaut werden sollten.

Die Frage, ob die Knappheit seltener Erden die Produktion und den Betrieb von Windkraftanlagen negativ beeinflusst und diese deutlich teurer werden lässt, stellt die Kernforschung der vorliegenden Arbeit dar. Sie kann an dieser Stelle begrenzt beantwortet werden. Zum einen wird durch aktuelle Fachartikel und Berichte zu dem Thema deutlich, dass eine allgemeine Alarmiertheit zu dem Thema vorliegt. Die Preiserhöhung durch China in 2011 hat vor allem die Windenergiebranche und Regierungen importabhängiger Länder aufmerksam gemacht, die ihren wirtschaftlichen Erfolg bzw. den raschen Ausbau der Windenergie bedroht sahen. Zwar ist der Markt der seltenen Erden derzeit stabil und Neodym und Dysprosium sind nicht überdurchschnittlich teuer, doch die Monopolmacht Chinas scheint nicht vollständig einsehbar und birgt somit zukünftig Risiken neuer Lieferrestriktionen oder Preisschwankungen. Da derzeit keine adäquaten Alternativen vorliegen, werden Hersteller von Windturbinen mit Direktantrieb weiterhin auf Chinas Exporte angewiesen sein. Einige Autor/innen von Fachartikeln sowie einige der befragten Experten relativieren jedoch die Risiken, die für die Windenergie entstehen. Der Anteil am weltweiten Bedarf liegt für die Windindustrie bei wenigen Prozent und macht somit nur eine kleine Menge aus. Dennoch gilt es zu beachten, dass der Anteil an mit Permanentmagnet betriebenen Anlagen deutlich steigt und gerade die größten Hersteller auf diese Technologie setzen. Dies sind Zeichen dafür, dass die Verwendung seltener Erden in Windkraftanlagen eine wichtige Rolle spielt und Lieferrisiken oder starke Preisanstiege das Potenzial haben, die Produktion einzuschränken. Besonders in Hinblick auf die Erreichung der Klimaziele und dem damit verbundenen Ausbau erneuerbarer Energien sollte diese Thematik weiter von Regierungen sowie Wirtschaft und Forschung verfolgt werden.

Da der Einfluss seltener Erden auf die Kosten von Windkraftanlagen in der vorliegenden Arbeit als kritisch eingestuft wird und derzeit keine adäquaten Substitute vorliegen, ist anzunehmen, dass Windturbinenhersteller in Zukunft versuchen werden, sich weniger abhängig von seltenen Erden zu machen. Dies hätte zur Folge, dass die Hersteller keine Permanentmagnete verwendeten und auf andere Technologien als den Direktantrieb setzten. Doch wie aus den vorangegangenen Absätzen deutlich wird, stellt der Direktantrieb eine besonders effiziente Nutzung der Windenergie in Bezug auf die Leistung dar, die bisher nicht ebenbürtig durch andere Bauweisen oder den Einsatz von Substituten oder Recycling ersetzt werden kann. Einer der interviewten Experten betonte, dass er in seinem Ingenieurbüro bewusst auf die Verwendung seltener Erden in Turbinenkonstruktionen verzichte, da ihm die Marktsituation zu viele Risiken berge. Im Gegensatz zu den großen Konzernen scheint dies jedoch die Ausnahme zu sein, denn aktuelle Prognosen besagen, dass der Anteil an direktangetriebenen Anlagen in Zukunft steigen wird. Insofern kann die Aussage getroffen werden, dass die Windenergiebranche auch oder gerade in Zukunft abhängig von seltenen Erden sowie möglichen Lieferrisiken und Preisschwankungen sein wird.

Bereits in Unterabschnitt 5.3.4 wurde geschildert, dass die durchgeführte Untersuchung international ausgeweitet werden könnte. In China und den USA sind besonders große Windkraftkonzerne ansässig, deren Meinung zur Verwendung seltener Erden in Windturbinen interessant wäre. Dies liegt vor allem daran, dass in diesen Ländern sehr viele große Offshoreanlagen gebaut werden, in denen typischerweise der Direktantrieb mit Permanentmagneten verwendet wird. In den USA wäre die Haltung der Windkraftanlagenhersteller in Bezug auf die mögliche Öffnung der Mountain Pass Mine oder neuer Minen untersuchenswert.

Darüber hinaus wird eine andere Technologie, die Elektromobilität, in den nächsten Jahren stark wachsen und immer größere Mengen seltener Erden benötigen. In Elektromotoren werden neben Neodym und Dysprosium noch weitere seltene Erden verbaut, die derzeit schon sehr teuer sind. Mit dem Hintergrund möglicher Lieferengpässe und Preisanstiege seltener Erden gewinnen Maßnahmen wie Recycling, Substitution und die Eröffnung neuer Minen außerhalb Chinas besonders für die Elektromobilität an Bedeutung.

Ein anderer Aspekt, der sich nach der Ergebnisauswertung ergab, ist der, dass der in der Forschungsfrage vermutete Einfluss seltener Erden auf Windkraftanlagen aus Kostensicht auch positiv sein kann. Zumindest in den letzten Jahren sind die Preise und Exportraten stabil und somit gut kalkulierbar. Aus technischer Sicht können bei der Produktion und dem späteren Betrieb von Windturbinen jedoch Kosten eingespart werden. Mit Permanentmagnet betriebene Anlagen benötigen in der Herstellung weniger Material und während des Betriebs sind sie weniger wartungsintensiv. Nach jetziger Zeitpunktanalyse kann, entgegen der ursprünglichen Annahme, der Einfluss seltener Erden auf Windkraftanlagen aus Kostensicht sogar positiv bewertet werden.

Dass seltene Erden einen Einfluss auf die Kosten erneuerbarer Energiesysteme haben, wird an der Windenergiebranche deutlich. 2011 bekam dieser Sektor bereits starke Preiserhöhungen von Seiten Chinas zu spüren und das mögliche Ausmaß der Monopolstellung wurde deutlich. Die Technologieentwicklung wird weiter in Richtung Direktantrieb gehen, weshalb seltene Erden auch auf mittelfristige Sicht für Windturbinen benötigt werden. Zwar kann argumentiert werden, dass der Anteil seltener Erden, der in Windkraftanlagen verbaut wird, verhältnismäßig gering ist und auch in den nächsten Jahren deutlich unter 10 Prozent des globalen Gesamtbedarfs liegen wird. Doch letztendlich spielt dies keine Rolle dafür, ob die Preise seltener Erden die Kosten in der Windenergie erhöhen können. Die Abhängigkeit wird weiterhin bestehen bleiben und aufgrund fehlender Ausweichmöglichkeiten werden plötzliche Preiserhöhungen und Lieferrestriktionen große Risiken bleiben. In dieser Masterarbeit wird der Einfluss seltener Erden auf die Windenergie daher als kritisch eingestuft. Zwar sind seltene Erden nicht für alle Anlagentypen notwendig, doch gerade in Hinblick auf den Klimawandel und den Ausbau erneuerbarer Energiequellen stellen eine hohe Leistung und eine darauf bezogene Effizienz wichtige Merkmale für nachhaltige Energiesysteme da, die in Windkraftanlagen derzeit am besten mit dem Einsatz von mit Permanentmagnet betriebenen Anlagen erreicht werden können. In Zukunft sollten Praxis und Forschung noch näher zusammenarbeiten, um die gegenwärtige Entwicklung zu beobachten und Alternativen wie Recycling, Substitute oder den Abbau seltener Erden außerhalb Chinas zu ermöglichen. Diese Alternativen werden in Zukunft nicht nur für die Windenergiebranche äußerst relevant sein, sondern auch viele andere Technologiebereiche betreffen.

7 Quellenverzeichnis

- Agora Energiewende & Sandbag, 2017, The European power sector in 2017. State of affairs and review of current developments, URL <https://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/482/The+European+Power+Sector+in+2017/>, Zugriff: 10.04.2018.
- Ali, S., 2014, Social and environmental impact of the rare earth industries, Resources, 3, 123-134.
- Apergis, E., Apergis, N., 2017a, The role of rare earth prices for consumer prices: an ignored factor?, Applied Economics, 49, 5890-5894.
- Apergis, E., Apergis, N., 2017b, The role of rare earth prices in renewable energy consumption: the actual driver for a renewable energy world, Energy Economics, 62, 33-42.
- APS, 2018, About APS, URL <https://www.aps.org/about/index.cfm>, Zugriff: 01.07.2018.
- artaxo AG, 2018, Windkraft, URL <http://www.steckdose.de/strom/windkraft/>, Zugriff: 21.05.2018.
- Ashby, M., 2016, Materials and sustainable development, Boston: Butterworth-Heinemann.
- Baldi, L., Peri, M., Vandone, D., 2014, Clean energy industries and rare earth materials: economic and financial issues, Energy Policy, 66, 53-61.
- BGR, 2017, BGR Energiestudie 2017 - Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung, 21, URL https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2017.html, Zugriff: 10.04.2018.
- Binnemans, K., Jones, P., Blanpain, B., van Gerven, T., Pontikes, Y., 2015, Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review, Journal of Cleaner Production, 99, 17-38.
- Binnemans, K., Jones, P., Blanpain, B., van Gerven, T., Yang, X., Walton, A., Buchert, M., 2013, Recycling of rare earths: a critical review, Journal of Cleaner Production, 51, 1-22.

- Bogner, A., Littig, B., Menz, W., 2014, Interviews mit Experten. Eine praxisorientierte Einführung, Wiesbaden: Springer VS.
- Bührke, T., Wengenmayr, R. (Herausgeber), 2011, Erneuerbare Energie - Konzepte für die Energiewende, 3. Auflage, Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2017, Wichtigste Ergebnisse der UN-Klimakonferenz COP 23 in Bonn, URL https://www.cop23.de/fileadmin/Daten/PDF/cop23_wichtigste_ergebnisse_bf.pdf, Zugriff: 12.05.2018.
- BWE, 2015, A bis Z - Fakten zur Windenergie, URL https://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/z-fakten-zur-windenergie/bwe_abisz_3-2015_72dpi_final.pdf, Zugriff: 20.05.2018.
- BWE, 2018a, BWE Branchenreport 2018 - Windindustrie in Deutschland, 8, URL <http://publikationen.windindustrie-in-deutschland.de/bwe-branchenreport-windindustrie-in-deutschland-2018/59968680>, Zugriff: 20.05.2018.
- BWE, 2018b, Der Bundesverband WindEnergie e.V., URL <https://www.wind-energie.de/verband/der-bwe/>, Zugriff: 11.07.2018.
- Chen, J., Wang, Q., 2017, Wind turbine airfoils and blades: optimization design theory, Boston: De Gruyter.
- Chu, S., Majumdar, A., 2012, Opportunities and challenges for a sustainable energy future, Nature, 488, 294-303.
- CMI, 2018, About CMI - The Critical Materials Institute, URL <https://cmi.ameslab.gov/about>, Zugriff: 01.07.2018.
- Degreif, S., Buchert, M., Bulach, W., Behrendt, S., Müller, F., 2017, Substitution als Strategie zur Minimierung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien, ReSource, 4, 65-84.
- Dieckhoff, C., Leuschner, A. (Herausgeber), 2016, Die Energiewende und ihre Modelle - Was uns Energieszenarien sagen können - und was nicht, Bielefeld: transcript-Verlag.
- Dincer, I., 2000, Renewable energy and sustainable development: a crucial review, Renewable and Su-

- sustainable Energy Reviews, 4, 157-175.
- Dutta, T., Kim, K., Uchimiya, M., Kwon, E., Jeon, B., Deep, A., Yun, S.-T., 2016, Global demand for rare earth resources and strategies for green mining, Environmental Research, 150, 182-190.
- Ebster, C., Stalzer, L., 2017, Wissenschaftliches Arbeiten für Wirtschafts- & Sozialwissenschaftler, Wien: Facultas, 5. Auflage.
- ECF, 2017, Cleaner, smarter, cheaper: responding to opportunities in Europe's changing energy system, URL <https://europeanclimate.org/de/cleaner-smarter-cheaper-responding-to-opportunities-in-europes-changing-energy-system/>, Zugriff: 10.04.2018.
- Eggert, R., 2017, Materials, critical materials and clean-energy technologies, EPJ Web of Conferences, 148(EDP Sciences).
- ENERCON GmbH, 2016a, Anlagenkomponenten - kontinuierliche Weiterentwicklung, URL <https://www.enercon.de/technologie/komponenten/>, Zugriff: 06.07.2018.
- ENERCON GmbH, 2016b, ENERCON, URL <https://www.enercon.de/home/>, Zugriff: 06.07.2018.
- ERECON, 2015, Strengthening the European rare earths supply-chain challenges and policy options - a report by the European rare earths competency network (ERECON), Europäische Kommission, URL <https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-01550114/document>, Zugriff: 10.04.2018.
- ERECON, 2018, European Rare Earths Competency Network (ERECON), URL https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en, Zugriff: 01.07.2018.
- EU, 2018a, Energy Efficiency Directive, URL <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive>, Zugriff: 12.05.2018.
- EU, 2018b, Emissionshandelssystem der EU, URL https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_de, Zugriff: 12.05.2018.
- EUREC, 2009, Research priorities for renewable energy technology by 2020 and beyond, URL <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ed145e39-f9a9-41b8-b6aa-26c4c9e7c649>, Zugriff: 10.04.2018.

- EUREC, 2018a, Renewable energy projects catalogue: a guide to successful and innovative projects in the area of renewable energy, URL <http://www.eurec.be/en/Policy-Publications/Publications/Renewable-Energy-Projects-Catalogue-2017/>, Zugriff: 10.04.2018.
- EUREC, 2018b, About, URL <http://www.eurec.be/en/About/Overview/>, Zugriff: 01.07.2018.
- Europäische Kommission, 2014, Report on critical raw materials for the EU, URL <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10010/attachments/1/translations>, Zugriff: 26.06.2018.
- Europäische Kommission, 2017, Study on the review of the list of critical raw materials - critical raw materials factsheet, URL <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>, Zugriff: 04.04.2018.
- Europäische Kommission, 2018, Emissionshandelssystem (EU-EHS), URL https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_de, Zugriff: 01.07.2018.
- Garrett, P, Rønne, K., 2011, Life Cycle Assessment of electricity production from a V90-2.0 MW Grid-streamer Wind Plant, Vestas Life Cycle Assessments, URL https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v902mw_version1.pdf, Zugriff: 06.07.2018.
- Garrett, P, Rønne, K., 2013, Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach, The International Journal of Life Cycle Assessment, 18, 37-48.
- GE Renewable Energy, 2018, Wind energy solutions, URL <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy>, Zugriff: 06.07.2018.
- Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission, 2017, Critical raw materials and the circular economy - background report, JRC Science for Policy Report, URL http://criticalrawmaterials.org/wp-content/uploads/2018/01/jrc108710-pdf-21-12-2017_final.pdf, Zugriff: 01.07.2018.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., 2016, Climate and energy challenges for material science, Natural Materials, 15, 117-120.
- Gläser, J., Laudel, G., 2004, Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

- Golev, A., Scott, M., Erskine, P., Ali, S., Ballantyne, G., 2014, Rare earths supply chains: current status, constraints and opportunities, *Resources Policy*, 41, 52-59.
- Goodenough, K., Wall, F., Merriman, D., 2018, The rare earth elements: demand, global resources and challenges for resourcing future generations, *Natural Resources Research*, 27, 201-216.
- Greenpeace, 2018, Abschied von den fossilen Energien, URL <https://www.greenpeace.de/themen/energiewende/fossile-energien>, Zugriff: 15.04.2018.
- Grübler, A., Jefferson, M., Nakicenovic, N., 1996, Global energy perspectives: a summary of the Joint-Study by the International Institute for Applied Systems Analysis and World Energy Council, *Technological Forecasting and Social Change*, 51, 237-264.
- GWEC, 2018, Global Wind Report - annual market update 2017, URL <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2016/>, Zugriff: 10.04.2018.
- Habib, K., Hamelin, L., Wenzel, H., 2016, A dynamic perspective on geopolitical supply risk of metals, *Journal of Cleaner Production*, 133, 850-858.
- Habib, K., Wenzel, H., 2014, Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling, *Journal of Cleaner Production*, 84, 348-359.
- Hannover Messe, 2018, Über uns, URL <http://www.hannovermesse.de/de/ausstellung/daten-fakten/ueber-uns/>, Zugriff: 10.07.2018.
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S., Vernon, C., 2014, Rare earth elements: overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact, *Resources*, 3, 614-635.
- Heimann, T., 2017, *Klimakulturen und Raum: Umgangsweisen mit Klimawandel an europäischen Küsten*, Wiesbaden: Springer.
- Hoenderdaal, S., Tercero Espinoza, L., Marscheider-Weidemann, F., Graus, W., 2013, Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies?, *Energy*, 49, 344-355.
- Hoffmann, A., 2012, Folgen des Klimawandels im urbanen Kontext, *Public Health Forum*, 20, 7-8.
- Hook, S., 2018, *Bausteine der Energiewende*, Wiesbaden: Springer, Kapitel „Energiewende“: von internationalen Klimaabkommen bis hin zum deutschen Erneuerbaren-Energien-Gesetz, S. 21-56.

- Hurd, A., Kelley, R., Eggert, R., Lee, M.-H., 2012, Energy-critical elements for sustainable development, MRS Bulletin, 37, 410-405.
- Hurst, C., 2010, China's rare earth elements industry: what can the west learn?, Institute for the Analysis of Global Security Washington DC.
- IEA, 2017, Tracking clean energy innovation progress, URL <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>, Zugriff: 10.04.2018.
- IEA, 2018, Our Mission, URL <https://www.iea.org/about/>, Zugriff: 01.07.2018.
- ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V., 2018, ifo Schnelldienst, URL <https://www.cesifo-group.de/de/ifoHome/publications/journals/ifo-Schnelldienst.html>, Zugriff: 17.07.2018.
- IIASA, 2018, IIASA in brief - information kit, URL <http://www.iiasa.ac.at/web/home/about/whatisiiasa/informationkit/brief.html>, Zugriff: 20.05.2018.
- Imholte, D., Nguyen, R., Vedantam, A., Brown, M., Iyer, A., Smith, B., Collins, J., Anderson, C., O'Kelley, B., 2018, An assessment of U.S. rare earth availability for supporting U.S. wind energy growth targets, Energy Policy, 113, 294-305.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis, URL https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-2-figure-1.html, Zugriff: 10.04.2018.
- IRENA, 2012b, Renewable energy technologies: cost analysis series - wind power, Power Sector Issue 5/5, URL https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-WIND_POWER.pdf, Zugriff: 10.04.2018.
- IRENA, 2016, Wind power: technology brief, URL <http://www.irena.org/publications/2016/Mar/Wind-Power>, Zugriff: 10.04.2018.
- IRENA, 2017, Rethinking Energy 2017: accelerating the global energy transformation, URL <http://www.irena.org/publications/2017/Jan/REthinking-Energy-2017-Accelerating-the-global-energy-transformation>, Zugriff: 10.04.2018.

- IRENA, 2018a, Renewable energy prospects for the European Union, URL <http://www.irena.org/publications/2018/Feb/Renewable-energy-prospects-for-the-EU>, Zugriff: 10.04.2018.
- IRENA, 2018b, About IRENA, URL <http://www.irena.org/aboutirena>, Zugriff: 20.05.2018.
- Irsch, W., 2003, Folgen des Klimawandels, *Biologie in unserer Zeit*, 33, 82-82.
- Jacobson, M., Deluchi, M., 2011, Providing all global energy with wind, water and solar power, part I: technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure and materials, *Energy Policy*, 39, 1154-1169.
- Joas, F., Pahle, M., Flachsland, C., 2014, Die Ziele der Energiewende: eine Kartierung der Prioritäten, *ifo Schnelldienst*, 67, 6-11.
- Kühne, O., Weber, F. (Herausgeber), 2018, *Bausteine der Energiewende*, Wiesbaden: Springer.
- Larcher, D., Tarascon, J.-M., 2014, Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage, *Nature Chemistry*, 7, 19-29.
- Margonelli, L., 2009, Clean energy's dirty little secret, *The Atlantic*, Mai-Ausgabe, 1. Jg.
- Massari, S., Ruberti, M., 2013, Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies, *Resources Policy*, 38, 36-43.
- Mayring, P., 2015, *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*, 12. Auflage, Weinheim: Beltz.
- Menges, R., Traub, S., 2012, Sozialpolitik im Klimawandel: Konfliktlinien zwischen sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit, *Zeitschrift für Sozialreform*, 58, 343-362.
- Mihalasky, M., Tucker, R., Renaud, K., Verstraeten, I., 2017, Rare earth element and rare metal inventory of central Asia, *US Geological Survey Fact Sheet*, 3089.
- Moffett, S., 2012, EU, US, Japan seek WTO steps on China rare earths, Reuters, BBC.
- Moss, R. L., Tzimas, E., H., K., Willis, P., Kooroshy, J., 2013, The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of strategic energy technologies, *Energy Policy*, 55, 556-564.
- MRS, 2018, About Us, URL <https://www.mrs.org/about-mrs>, Zugriff: 01.07.2018.

- Mukherji, B., Wright, T., 13.08.2012, India bets on rare-earth minerals, The Wall Street Journal.
- Nassar, N., Du, X., T. E., G., 2015, Criticality of the rare earth elements, Journal of Industrial Ecology, 19, 1044-1054.
- Nguyen, R., Fishman, T., Zhao, F., Imholte, D., Graedel, T., 2018, Analyzing critical material demand: a revised approach, Science of the Total Environment, 630, 1143-1148.
- Nhamo, G., 2016, Sustainability, climate change and the green economy, Pretoria: Africa Institute of South Africa, Kapitel Sustainability, climate change and green economy transition: contextual settings, S. 3–16.
- Nizhegorodtsev, R., Ratner, S., 2016, Trends in the development of industrially assimilated renewable energy: the problem of resource restrictions, Thermal Engineering, 63, 197-207.
- Nordex SE, 2013, Nordex, URL <http://www.nordex-online.com/de>, Zugriff: 06.07.2018.
- Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2018, About the Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, URL <https://www.energy.gov/eere/about-office-energy-efficiency-and-renewable-energy>, Zugriff: 01.07.2018.
- Pardo Martínez, C., Alfonso Pina, W., Fletcher Moren, S., 2018, Prevention, mitigation and adaptation to climate change from perspectives of urban population in an emerging economy, Journal of Cleaner Production, 178, 314-324.
- Parmesan, C., Yohe, G., 2003, Folgen des Klimawandels auf die Fauna, Nature, 421, 37-42.
- Potsdam-Institut für Klimaforschung & Institut für Gesellschaftspolitik München, 2010, Global aber gerecht: Klimawandel bekämpfen, Entwicklung ermöglichen, München: C. H. Beck.
- Rabe, W., Kostka, G., Smith Stegen, K., 2017, China's supply of critical raw materials: risks for Europe's solar and wind industries?, Energy Policy, 101, 692-699.
- Raman, S., 2013, Fossilizing renewable energies, Science as Culture, 22, 172-180.
- Rezai, A., Taylor, L., Foley, D., 2018, Economic growth, income distribution and a climate change, Ecological Economics, 146, 164-172.

- Rhodes, C., 2017, US Withdrawal from the COP21 Paris Climate Change Agreement and its possible implications, *Science Progress*, 100, 410-419.
- Rollat, A., Guyonnet, D., Planchon, M., Tuduri, J., 2016, Prospective analysis of the flows of certain rare earths in Europe at the 2020 horizon, *Waste Management*, 49, 427-436.
- Sadden, E., 2011, Siemens reducing rare earths, *Business of Green Energy*, URL <https://www.reuters.com/article/idUS332593104620110713>.
- Salawitch, R. J., Canty, T. P., Hope, A. P., Tribett, W. R., Bennett, B. F., 2017, *Paris Climate Agreement: beacon of hope*, Cham: Springer International.
- Schlör, H., Zapp, P., Marx, J., Schreiber, A., Venghaus, S., Hake, J.-F., 2017, The social footprint of permanent magnet production based on rare earth elements - a social life cycle assessment scenario, *Energy Procedia*, 142, 984-990.
- Schmidt, H., Eyring, V., Latif, M., Rechid, D., Sausen, R., 2017, Globale Sicht des Klimawandels, S. 8-16, in: *Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*, Berlin: Springer Spektrum.
- Schönwiese, C., 2008, *Klimatologie*, Stuttgart: Eugen Ulmer KG.
- Schulz, K., DeYoung, J., Bradley, D., Seal, R., 2017a, Critical mineral resources of the United States - an introduction, *US Geological Survey Professional Paper*, 1802, O1-O31.
- SEAI Energy Show, 2018, SEAI Events, URL <https://www.seai.ie/events/seai-energy-show-2018/>, Zugriff: 10.07.2018.
- Siemens Gamesa Renewable Energy S.A., 2018, Siemens Gamesa, URL <https://www.siemensgamesa.com/en-int>, Zugriff: 06.07.2018.
- Smith Stegen, K., 2014, Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: an imminent crisis, *Energy Policy*, 79, 1-8.
- Stern, N., 2009, *Der Global Deal. Wie wir dem Klimawandel begegnen und ein neues Zeitalter von Wachstum und Wohlstand schaffen*, Weltklimakonferenz in Kopenhagen 2009, München: C. H. Beck.
- Streitz, C., 2018, Vestas bets on geared turbines to propel it to margin goal, *Reuters*, 2. Fe-

- bruar, URL <https://www.reuters.com/article/us-vestas-wind-results-gearbox/vestas-bets-on-geared-turbines-to-propel-it-to-margin-goal-idUSKBN1FS2X0>, Zugriff: 06.07.2018.
- UN, 2015, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, URL <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>, Zugriff: 10.04.2018.
- UNFCCC, 1999, Informationsblätter zum Klimawandel, URL <http://unfccc.int/resource/iuckit/infokitger.pdf>, Zugriff: 10.04.2018.
- UNFCCC, 2016a, Climate action now: summary for policymakers 2016, URL http://unfccc.int/resource/climateaction2020/media/1281/unfccc_spm_2016.pdf, Zugriff: 10.04.2018.
- UNFCCC, 2016b, The Paris Agreement, URL <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>, Zugriff: 10.04.2018.
- US Department of Energy, 2018, About Us, URL <https://www.energy.gov/about-us>, Zugriff: 01.07.2018.
- US Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy, 2015, 2016-2020 Strategic Plan and Implementing Framework, URL <https://www1.eere.energy.gov/library/viewdetails.aspx?productid=7278>, Zugriff: 21.05.2018.
- US Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy, 2016, 2016 - 2020 Strategic Plan at a glance, URL https://www1.eere.energy.gov/library/pdfs/eere_trifold_strategic_plan.pdf, Zugriff: 10.04.2018.
- US Environmental Protection Agency, 2012, Rare earth elements: a review of production, processing, recycling, and associated environmental issues, 600/R, URL <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe?User=ANONYMOUS&Back=ZyActionL&BackDesc=Contents+page&Client=EPA&DefSeekPage=x&Display=hpfr&Docs=&ExtQFieldOp=0&File=&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r85g16%2Fr85g16%2Ffx150y150g16%2Fi500&Index=2011%20Thru%202015&IndexPresets=entry&IntQFieldOp=0&MaximumDocuments=15&MaximumPages=1&Password=anonymous&QField=&QFieldDay=&QFieldMonth=&QFieldYear=&Query=Rare%20Earth%20Elements%20Review%20Production%20Processing%20Recycling%20Associated%20Environmental%20Issues%20&SearchBack=ZyActionL&SearchMethod=>

- 2&SeekPage=&SortMethod=-&SortMethod=h&Time=&Toc=&TocEntry=&TocRestrict=n&UseQField=&ZyAction=ZyActionS&ZyEntry=0, Zugriff: 10.04.2018.
- Van Gosen, B., Verplanck, P., Seal, R., Long, K., Gambogi, J., 2017, Rare-earth elements, US Geological Survey Professional Paper, 1802.
- Vestas Wind Systems A/S, 2018, Vestas, URL <https://www.vestas.com/en>, Zugriff: 06.07.2018.
- Vitale, G., 2016, Renewable energies - future perspectives, Renewable Energy and Environmental Sustainability, 1, 1-5.
- Voorhar, R., Myllyvirta, L., 2013, Point of no return, Greenpeace, URL <https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/20130122-Studie-Point-Of-No-Return-Erderwaermung.pdf>, Zugriff: 15.04.2018.
- Walker, G., Cass, N., 2007, Carbon reduction, 'the public' and renewable energy: engaging with socio-technical configurations, Area, 39, 458-469.
- WEC, 2017a, World energy issues monitor 2017, URL <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-issues-monitor-2017/>, Zugriff: 10.04.2018.
- WEC, 2017b, World energy trilemma index 2017, URL <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-trilemma-index-2017-monitoring-the-sustainability-of-national-energy-systems/>, Zugriff: 10.04.2018.
- WEC, 2018, About the World Energy Council, URL <https://www.worldenergy.org/about-wec/>, Zugriff: 20.05.2018.
- Weimann, J., 2016, Anspruch und Wirklichkeit: Kann das Pariser Klimaabkommen funktionieren?, ifo Schnelldienst, 69, 3-5.
- Weng, Z., Haque, N., Mudd, G., Jowitt, S., 2016, Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements, Journal of Cleaner Production, 139, 1282-1297.
- WindEnergy Hamburg, 2014, N131/3000 - Nordex Multi-MW Technologie der Generation Delta für das Binnenland, Windmesse Technik-Symposium Review, URL <http://w3.windmesse.de/windenergie/news/17714-n131-3000-nordex-multi-mw-technologie-der-generation-delta-fur-das-binnenland>, Zugriff: 06.07.2018.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, 2008, Welt im Wandel - Sicherheitsrisiko Klimawandel, Berlin: Springer.

WTO, 2018, Overview, URL https://www.wto.org/english/thewto_e/whatis_e/what_stand_for_e.htm, Zugriff: 06.07.2018.

8 Anhänge

Interviewleitfaden zum Thema „Wie Preise und Verfügbarkeit seltener Erden die Kosten nachhaltiger Energiesysteme beeinflussen“

Gesprächseinstieg:

- Vorstellung des Themas der Masterarbeit und Erklärung der Absichten in Bezug auf das Ergebnis
- Absprache über Tonbandaufzeichnung - Einverständniserklärung
- Information über Veröffentlichung der MA bzw. Geheimhaltung/ Anonymisierung der Unternehmensdaten
- Aufklärung über erwartete Antworten: Detailgrad zum Teil unwichtig - grobe Experteneinschätzung reicht zunächst, wenn nichts anderes möglich
- kurze Vorstellung der Person; Beruf (Branche und Einordnung des Unternehmens/ des Instituts/ ..., Tätigkeiten, Verantwortungsbereiche, sonstige Aktivitäten)

Block 1: Verständnis von und Austausch über jeweiliges Feld nachhaltiger Energiesysteme

- Welche Beziehung haben Sie zu erneuerbaren Energien und in welchem Bereich arbeiten Sie?
 - o Inwiefern trägt Ihre Arbeit (Ihr Unternehmen) zur Energiewende bei?
 - o Können Sie eine Einschätzung dazu abgeben wie nachhaltig das Energiesystem (die Energiesysteme) ist, mit dem Sie sich beschäftigen? Können Sie eine Einschätzung dazu geben wie nachhaltig Windenergie in Ihrem Arbeitsumfeld produziert wird?
 - Material, Herstellung, Produktion

Block 2: Seltene Erden (Inwieweit werden seltene Erden überhaupt thematisiert im Bereich der erneuerbaren Energien/ wie bekannt sind sie?)

- Wie präsent ist das Thema „seltene Erden“ in Ihrem Tätigkeitsbereich grundsätzlich?
 - o Haben Sie schon Literatur/ wissenschaftliche Artikel zu diesem Thema gelesen?
 - o Haben Sie darüber schon mit anderen KollegInnen/ GeschäftspartnerInnen/ WissenschaftlerInnen gesprochen?
 - o Sind seltene Erden Thema auf wissenschaftlichen/ geschäftlichen Tagungen?
- Was wissen Sie über die Lebenszyklen von seltenen Erden in der Verwendung und deren Entsorgung oder möglichen Wiederaufbereitung (Recycling)?
- Welche Rolle spielen seltene Erden im Unternehmen?
 - o Welche Rolle spielt die Beschaffung von seltenen Erden im Unternehmen? Welche Abteilung beschäftigt sich mit dem Thema „seltene Erden“? → Einkauf
 - o Kennen Sie die aktuelle Marktsituation der seltenen Erden - wird diese in Ihrem Unternehmen diskutiert?

Block 3: Zusammenhang zwischen seltenen Erden und erneuerbaren Energiesystemen (Besteht ein Bezug zwischen seltenen Erden und erneuerbaren Energiesystemen im jeweiligen Bereich/ werden die Kosten für Beschaffung, Wiederaufbereitung und Entsorgung berücksichtigt?)

- Seit wann beschäftigen Sie sich mit dem Zusammenhang zwischen seltenen Erden und erneuerbaren Energiesystemen? / Seit wann ist Ihnen der Zusammenhang zwischen seltenen Erden und erneuerbaren Energiesystemen ein Begriff?
- Inwiefern haben Sie Einblick in die Kosten während Planung, Herstellung und Betrieb von nachhaltigen Energiesystemen?
 - o In welcher Art und Weise werden seltene Erden für die Kosten für
 - Planung,
 - Herstellung,
 - Betriebvon Windkraftanlagen berücksichtigt?
 - o Beeinflussen die u.U. starken Preisanstiege seltener Erden die Herstellung/ den Betrieb von Windkraftanlagen?
 - o Werden aus Kostengründen (ökologischen Gründen) Alternativmaterialien als Substitute für seltene Erden in Betracht gezogen?
 - o Ist die Lebensdauer der Windkraftanlagen exakt festlegbar? (Gibt es schon Erfahrungswerte?)
 - Wird die Entsorgung und mögliche Wiederaufbereitung der verbauten seltenen Erden in Windkraftanlagen einkalkuliert, wenn ja, inwiefern (preislich, logistisch, ökologisch/..)?
 - o Wissen Sie, woher die verwendeten seltenen Erden stammen, die in „Ihre“ erneuerbaren Energiesysteme verbaut werden?

Block 4: Bewertung/ kritische Einschätzung des Zusammenhangs zwischen seltenen Erden und ihrem Einfluss auf die Kosten erneuerbarer Energiesystemen

- Wie bewerten Sie den Einfluss seltener Erden auf die Kosten von Windkraftanlagen in Bezug auf deren Planung, Herstellung und Betrieb(-sdauer)?
 - o Wo sehen Sie die größten Chancen/ Schwierigkeiten?
 - Beschaffung seltener Erden
 - Wiederaufbereitung seltener Erden
 - Entsorgung seltener Erden
- In welche Richtung wird sich der Einfluss seltener Erden auf Windkraftanlagen Ihrer Meinung nach auf lange Sicht hin entwickeln?
 - o Substitute
 - o andere Produktionsstätten
 - o politische Restriktionen/ Maßnahmen
 - o Recycling

Interview: „How does the scarcity of rare earths effect the costs of renewable energy systems? “

Introduction:

- Introduction of the topic, explanation of the master thesis' intention and expected results
- declaration of content in respect of tape/ audio recording
- information about publication, if necessary anonymization especially with regard to company name etc.
- clarification related to expected answers: level of detail occasionally unimportant - rough estimate might be sufficient for some of the questions
- short introduction of the interviewed person; job (branch and classification of the company/ institute/ university ..., responsibilities, further activities)

Block 1: Understanding of and exchange about respective sector of green energy systems

- What kind of relation do you have in respect of green energies and in which area do you work?
 - o To what extent does your work company contribute to the energy revolution?
 - o Can you evaluate how sustainable or green the energy system is that you are working with? (in respect of materials, manufacturing, energy production)

Block 2: Rare earths

- Are rare earths generally on the spot in your area of work?
 - o Have you been in touch with that topic/ have you read books or scientific articles on that topic?
 - o Have you been discussing that topic with colleagues/ business partners/ other researchers yet?
 - o Are rare earths subject to scientific/ business-related conferences or congresses?
- What do you know about rare earths' life cycles in terms of their use, disposal and recycling?
- Which role do rare earths play in within the company?
 - o How important is the issue of procurement within the company? Which department is concerned with the topic rare earths? Purchasing department?
 - o Do you have an impression of the current market situation of rare earths? Is the current market situation being discussed within the company?

Block 3: Relation between rare earths and renewable energy systems Do companies consider the costs of purchasing, recycling and disposal?

- Since when are you concerned with the relation between rare earths and renewable energy systems? / Since when are you being aware of the relation between rare earths and renewable energy systems?
- To what extent do you have insight into the costs of renewable energy system in respect of manufacturing and operations?
 - o In what manner does your company consider rare earths in connection to
 - planning,
 - manufacturing,
 - operationsof wind turbines?
 - o Does the price fluctuation of rare earth prices have an influence on the production/ operations of wind turbines?
 - o Are substitutes being considered as more ecological and economic alternatives for rare earths?
 - o Is it possible to define an energy system's lifespan? Do manufacturers of wind turbines indicate lifespans? (Are there any figures available at all?)
 - What about the recycling and disposal possibilities of rare earths used in renewable energy systems, if yes, to what extent? (cost wise, logistical, ecological/..)?
 - o Do you know where the rare earths that are used in renewable energy systems (you are conversant with) come from?

Block 4: Evaluation/ critical assessment of the correlation between rare earths and their impact on the costs of renewable energy systems (What does experts say in respect of the current impact of rare earths on the costs of renewable energy systems?)

- How do you assess the impact of rare earths on the costs of renewable energy systems with regards to planning, production and operations?
 - o In which areas do you see chances/ difficulties?
 - purchase of rare earths
 - recycling of rare earths
 - disposal of rare earths
- In what direction do you think will the rare earths' impact on renewable energy system evolve o the long run?
 - o substitutes
 - o different production sites
 - o political restrictions/ measures
 - o recycling

Interview Nr. 1

Termin: 18.04.2018 (Ausschnitt aus Stellungnahme per Email)
Interviewerin A: Nomi Parnitzke
Interviewpartner B: Professor
Institution: dänische Universität
Kontakt: persönlich und direkt kontaktiert

1 **A:** I am writing my Master's thesis on the topic „How does the shortage of rare earths effect
2 the costs of renewable energy systems“, During my literature research, I came across several
3 scientific articles you have written in that area (especially: „Exploring rare earths supply
4 constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling“). Your
5 remarks and research results were of great interest to me and very valuable for my own work.

6 **B:** As you can see in one of our articles, it is relatively easy to find substitutes for rare earths.
7 I do not really expect the market price of rare earths to have any significant influence on the
8 cost of energy systems. Partly because of substitutions easily found, partly because the cost of
9 rare earths is very insignificant in relation to the cost of the energy conversion technologies
10 themselves, e.g. wind turbines, solar cells, etc. even a 10-doubling of Nd and Dy markets
11 prices would be hardly detectable in the cost of a wind turbine.

12 **A:** As you can see from the questions, it is not only the REEs' effect on the costs of
13 renewable energy systems but also their scarcity and some general facts about REEs and their
14 presence in research and industry that I am investigating.

15 **B:** Yes, I agree with your points, but partly, I don't think we will face a scarcity issue, maybe
16 on a short-medium term for especially Dy, because China is sitting on such a large share of
17 world production just now (97%), but on a longer term, substitution, recycling and opening of
18 new mines will compensate even for this element, and any price peaks will tend to disappear
19 again after some shorter time period, as they have done for all scarce resource crises till now.
20 See e.g. Figure 2.4 in the attached thesis. And with respect to price increase and influence on
21 renewable energy cost in general – even a factor of 10 price increase of rare earth element
22 will influence the total cost of energy systems only minutely, and a factor of 10 increase is not
23 likely to happen.

Interview Nr. 2

Termin: 23.04.2018
Dauer: ca. 30 Min. mündlich, dann schriftlich ausgefüllt per Email
Interviewerin A: Nomi Parnitzke
Interviewpartner B: Manager
Unternehmen: großer europäischer Windkraftanlagenhersteller
Kontakt: über Messe in Dublin

1 **A:** What kind of relation do you have towards green energies and in which area do you work
2 in?

3 **B:** I work on wind turbine supply contracts.

4 **A:** Are rare earths generally on the spot in your area of work/ are they being used in your
5 company's products? Have you been in touch with that topic/ have you read books or
6 scientific articles on that topic?

7 **B:** No, only what is available online, press articles.

8 **A:** Have you been discussing that topic with colleagues/ business partners/ other researchers
9 yet?

10 **B:** Yes we discuss with colleagues and business partners but not researchers.

11 **A:** Are rare earths subject to scientific/ business-related conferences or congresses?

12 **B:** No.

13 **A:** What do you know about rare earths' life cycles in terms of their use, disposal and
14 recycling?

15 **B:** I actually know very little about the end of life of rare earth metals.

16 **A:** Is the current market situation subject to discussion within your company?

17 **B:** The Environmental concerns in relation to the extract are discussed regularly.

18 **A:** Since when are you being aware of the relation between rare earths and renewable energy
19 systems?

20 **B:** The last five years.

21 **A:** To what extent do you have insight into the costs of renewable energy system in respect of
22 manufacturing and operations?

- 23 • planning,
24 • manufacturing,
25 • operations

26 of renewable energy systems/ wind turbines/ solar cells? Does the price fluctuation of rare
27 earth prices have an influence on the production/ operations of wind turbines/ solar cells?

28 **B:** Given the relatively low cost and weight advantages the initial design and production
29 decisions are currently not too much affected by the pricing fluctuation, however for certain
30 manufactures which are focused operational cost the pricing fluctuation is a concern or more

31 specifically the unknown future costs has affected their design and material selection
32 decisions.

33 **A:** Are substitutes being considered as more ecological and economic alternatives for rare
34 earths?

35 **B:** For generators and the internal magnetics, electrically excited magnetics as opposed to
36 permanent magnets is been considered and selected with relatively abundant copper and
37 aluminum as the material of choice. For batteries li-ion is the definite preferred choice but as
38 utility scale energy storage is in its infancy this could easily change very quickly.

39 **A:** How long is the lifespan of solar cells/ wind turbines? What do you know about the
40 recycling and disposal possibilities of rare earths used in renewable energy systems? (cost
41 wise, logistical, ecological/..)?

42 **B:** The life span of wind turbines is 20 years on average, and there are specific component
43 warranties on permanent magnets from manufactures and these are usually 30 years.

44 **A:** How do you assess the impact of rare earths on the costs of renewable energy systems with
45 regards to planning, production and operations? In which areas do you see chances/
46 difficulties?

- 47 • purchase of rare earths
- 48 • recycling of rare earths
- 49 • disposal of rare earths

50 **B:** Purchasing and extract of rare earth is the main concern and impact.

51 **A:** In what direction do you think will the rare earths' impact on renewable energy system
52 evolve over the long run?

- 53 • substitutes
- 54 • different production sites
- 55 • political restrictions/ measures
- 56 • recycling

57 **B:** Renewable energy system will continue to rely on rare earths metals, but they will be used
58 in more efficient ways (we have already seen a drop in the percentage of dysprosium used in
59 permanent magnets from 4 to 2%), and as public/political awareness grows manufactures will
60 be more open in origin and environmental process of extract will be improved, i.e. more rare
61 earths will come from the likes of Australia with proven environmental extract process and
62 the prices will then be higher but more stable.

Interview Nr. 3

Termin: 04.05.2018 in Berlin (Bibliothek des BWE)
Dauer: 34:44 Min. (netto)
Interviewerin A: Nomi Parnitzke
Interviewpartner B: Wolf Stötzel
Unternehmen: Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE)
Kontakt: über Hannover Messe

1 **A:** Das Thema hatte ich ja schon vorgestellt, eben, ob sich die Kosten seltener Erden
2 auswirken auf erneuerbare Energien. Würde Sie vielleicht ganz kurz sagen können, was Ihre
3 Aufgabenbereiche sind hier?

4 **B:** Also hier im BWE gibt es den Bereich Fachgremien und Technik und es gibt zwei
5 Ingenieure, zwei Techniker, hier im BWE und die betreuen den ganzen Part Technik. Die
6 Leute, die hier im BWE mit der Technik zutun haben: Betriebsführer, Betreiber,
7 Anlagenhersteller, Serviceunternehmen.

8 **A:** Also viel Kontakt auch mit den Herstellern als Mitglieder des BWE?

9 **B:** Ja, genau. Also wie gesagt es gibt viele verschiedene Kontakte, einmal den politischen
10 Kontakt auch hier, aber unser Part über die Betreiber ist hier den Kontakt zum Hersteller, zum
11 Service herzustellen. und, ähm, ein solcher ist, die sind im Endeffekt schon ein Vermittler
12 zwischen Betreiber und Hersteller, ganz oft. Weil der Hersteller gleichzeitig auch oftmals den
13 Service für die Anlagen stellt, gibt es da in der Regel am meisten Fragestellungen.

14 **A:** Genau, das wäre jetzt praktisch schon Block 1 gewesen und dementsprechend ja auch
15 vielleicht eine Einschätzung dazu wie nachhaltig Windenergie tatsächlich ist oder produziert
16 wird, also jetzt vielleicht schon in Bezug auf seltene Erden oder grundsätzlich.

17 **B:** Also grundsätzlich, ähm, ich sage mal von der Entstehungsgeschichte schwingt ein
18 gewisser Teil von Idealismus mit in der Branche, das ist so. Und, ähm, das war auch für die
19 Hersteller nicht immer einfach, ähm, diese neue Branche da irgendwie neu ins Leben zu
20 rufen, sie versuchen in vielen Teilen schon, äh, in Bereich gewisse Nachhaltigkeit, in der
21 Produktion ist es aber in den Bereichen schwierig, wo sie auf globale Märkte zurückgreifen.
22 Also das ist bei allen Erzen so, wenn wir bei dem Thema Neodym sind, wenn wir bei Stahl
23 sind, für die Turmkomponenten, und ich sage mal bei Umrichtern und bei Kupfer, bei dieser
24 ganzen Schwermaschinenbautechnik schwierig. Ähm, es gibt ähnliche Fragen, was die
25 Ökobilanzen angeht, haben sich die Hersteller schon selber gestellt. Vestas ist ein schönes
26 Beispiel, die sind da sehr aktiv an dem Thema dran, also die erstellen extra Ökobilanzen, das
27 kann man bei denen auch direkt anfragen, wenn Sie da noch Infos brauchen, bei der
28 Pressestelle oder so, da konnte ich Ihnen vielleicht auch einen Kontakt geben, die extra für
29 ihre Anlagen so Ökobilanzen aufstellen. Die sind natürlich von ihnen selber, natürlich ist das
30 dann immer mit Vorsicht zu genießen, aber im Kern sind die halbwegs ehrlich, also ich hab
31 die auch gesehen und in bestimmten Bereichen da ist es eben schwierig. Rotorblätter hatte ich
32 ja schon angesprochen, die sind halt aus Oxidharzen, Polyesterharzen, Vinyl, also aus
33 verschiedenen Kunstharzen, die sind in der Tegel nicht nachhaltig, weil sich nicht recycelbar
34 sind, es sei denn man sagt thermische Verwertung ist Recycling. Ähm, damit tun wir uns auch
35 schwer, also ist halt eine Komponente, da ist es wirklich schwierig. Anders ist es natürlich bei
36 Eisen, Stahl-/ Metallkomponenten, Kupfer, dem Turm, das ist alles in Regel, da gibt es
37 etablierte Recyclingstrukturen in Deutschland, auch weltweit, das ist kein Thema, Der große
38 Teil der Anlage ist halt Stahl/ Eisen, äh, im weitesten Sinne. Dann haben wir da natürlich den
39 Betonbereich, das ist auch quasi auch wie sagt man heutzutage, „downsizing“, also das ist

40 natürlich kein gleichwertiges Produkt am Ende, das da rauskommt, wenn Sie das Zeug klein
41 machen und dann im Straßenbau verwenden, aber, ähm, zumindest gibt es da etablierte
42 Strukturen, es landet nicht auf der Halde. genau mit den Rotorblättern, die landen auch nicht
43 auf der Halde. Ähm, irgendwann hat sich, es gab mal eine Deponieverordnung, keine
44 Ahnung, Mitte der 2000er, seitdem können Sie auch Rotorblätter und so etwas nicht mehr
45 einfach deponieren, sondern Sie müssen das einem Recyclingprozess zuführen, weil der
46 Energiegehalt über einem bestimmten Wert liegt. Ich weiß jetzt gar nicht wie der war. Ich
47 glaube 15 Kilojoule pro Kilogramm oder so. Und, ähm, also da hat sich sozusagen eine
48 Recyclingstruktur entwickelt. Man versucht allerdings, z. B. auch bei Rotorblättern neue
49 Stoffe einzusetzen, die nicht so schwierig sind in der Produktion, die weniger Energieaufwand
50 haben. Beim Beton gibt es und gab es ja einige Testvarianten und die auch verkauft wurden
51 mit Holz, also Holztürme, Timber Tower. Also ein Hersteller, der ist leider insolvent
52 gegangen, kam am Markt nicht so richtig an, aber war ein echter Holzturm und hat auch eine
53 2 Megawatt-Anlage getragen, war alles schick, war alles zertifiziert, also man versucht dann
54 schon, in, ähm, in bestimmten Bereichen da nachhaltiger zu sein, aber es ist nicht
55 allumfassend, muss man zugeben. Und bei Neodym, bei seltenen Erden, ähm, sind halt wie
56 gesagt die Mengen so gering, dass es da auch gar nicht möglich ist beim jetzigen Weltmarkt,
57 denn zu über 95% kommt das Zeug aus China, dann haben Sie keine, also die paar
58 Bergwerke, die es noch gab da in Kanada, die haben ja dicht gemacht, USA auch und wenn
59 Sie da Kleinabnehmer sind in diesem Maßstab, ist es halt irgendwie wahrscheinlich schwierig
60 für einen Windkraftanlagenhersteller sich da direkt und nicht am Weltmarkt in
61 herkömmlichen Lieferketten zu bedienen. Und, ähm, kleines Beispiel: Vestas, fällt mir gerade
62 noch ein, hatte auch Neodymmagnete, aber nicht in großen Mengen, ähm, in Anlagen, die
63 keinen Permanentmagneten erregten Generator haben, sondern die haben schon auch in
64 Hinblick auf diesen Nachhaltigkeitsgedanken und auf die Ökobilanz, äh, versucht die
65 Materialeinsätze zurückzufahren, haben eine relativ dynamisch belastete Anlage konstruiert
66 mit sehr weichem Turm, sehr dünner Turmwandung, also sehr viel weniger Materialeinsatz
67 als vorher, allerdings ist der Turm dann so dünn geworden, dass sie da keine Löcher mehr
68 bohren können und keine Leitern anschweißen können, ähm, und daher werden Magneten
69 eingesetzt, um die Leiter zu fixieren, also wenn Sie irgendwas am Turm bei dieser Vestas-
70 Anlage an die Wand bringen wollen, nimmt man einen Neodymmagnet, etwa so große wie
71 ein Teller, der wird einmal positioniert und ist der halt dran, den kriegen Sie auch nie wieder
72 weg. Und dann hängt die Leiter dran und da können Sie drauf, also da hat man es mit Hilfe
73 des Neodyms geschafft, ist natürlich ein bisschen irrwitzig, aber da hat man mit Hilfe der
74 Magneten geschafft, äh, den Turm so zu konstruieren, dass man einen erheblich an Material
75 einspart. Muss man sich genau angucken, die Hersteller sind da immer nicht ganz so freizügig
76 in den Infos(...) Es gibt ganz grob verschiedene Anlagenkonzepte. Man kann eine Anlage
77 sehr steif konstruieren, sehr starr, wie Enercon mit einem sehr starren Turm, der sich nicht
78 stark bewegt mit steifen Rotorblättern, ähm, natürlich brauchen Sie dazu Masse. Sie können
79 aber auch eine Anlage sehr dynamisch konstruieren mit einem weichen Turm, weichen
80 Rotorblättern, wo die Lasten, ich sage mal „weich“ abgefedert werden. Das hat beides Vor-
81 und beides Nachteile und Vestas ist eher der Art in die weiche Richtung. Also wenn man jetzt
82 mal so Beispiele machen möchte. Andere liegen so dazwischen. Was den Materialeinsatz
83 angeht, hat natürlich das weichere System Vorteile, allerdings zählt zu den Gedanken der
84 Ökobilanz ja auch wenn man den gesamten Betriebszeitraum der Anlage betrachtet, wie lange
85 ist die bestreubar und wie lange sind die einzelnen Komponenten haltbar. Das spielt ja dann
86 auch mit rein. Und in der Regel werden die Anlagen für 20 Jahre ausgelegt oder wurden für
87 20 Jahre ausgelegt, muss man sagen, mittlerweile versucht man sie etwas länger auszulegen,
88 also Enercon, weiß ich, hat 25 Jahre Betriebszertifizierung gemacht und man versucht da
89 diesen Zeitraum, obwohl es nur eine gesicherte Vergütung über 20 Jahre gibt, trotzdem die
90 Anlagen auf mehr auszulegen. Erfordert natürlich auch ein bisschen mehr Investition in die

91 Materialien. Ja, das Arbeitsumfeld, es ist halt eine Industrie, da weiß ich nicht wie nachhaltig
92 man das einschätzen kann.

93 **A:** Nee, aber das war eine gute Einschätzung gerade auch Hinblick auf, ähm, auf die
94 Materialkosten und es war auch mein Eindruck jetzt, seit ich mit der Branche ein bisschen in
95 Kontakt bin, dass man das schon groß schreibt. Da steckt ja auch was dahinter, wenn man
96 sich dafür entscheidet, so etwas rauszubringen

97 **B:** Das ist schon so, aber klar, kann es noch besser werden.

98 **A:** Da gibt es ja immer das Potenzial.

99 **B:** Es ist klassischer Maschinenbau, muss man wirklich sagen und es ist auch so, dass es
100 Lieferketten gibt, wovon Sie sich nicht immer komplett frei von machen können. man kann
101 natürlich die Philosophie verfolgen, ganz viel inhouse selber zu machen, ähm, die Enercon,
102 das ist ja bekannt, die haben eine sehr hohe Fertigungstiefe, oder andere wie Vestas oder
103 Senvion, die halt im Endeffekt Maschinenkomponenten am Markt komplett kaufen und dann
104 zusammenbauen als Montagesystem und, ähm, und wenn ich jetzt als Senvion Getriebe bei
105 Eckhoff kaufe, dann habe ich auch nicht die komplette Lieferkette im Blick. So viele
106 Getriebehersteller gibt es dann auch nicht, auf die man dann zurückgreifen könnte. Und, ähm,
107 es gibt auch genug chinesische und das heißt ja aus dem Qualitätsgesichtspunkt her noch
108 lange nicht, dass die in der Bilanz schlechter da stehe, das muss auch nicht so sein, aber
109 wirklich überblicken kann ich sie auch nicht.

110 **A:** Ok, dann, ähm, zum Thema seltene Erden, ähm, da würde ich grundsätzlich gerne wissen
111 wie präsent das Thema ist. ich hab auch schon mit Leuten aus der Branche gesprochen und
112 bei denen war es eben noch nicht so bekannt oder bei anderen eben sehr. Ähm, Sie haben sich
113 ja grundsätzlich schon sehr damit beschäftigt oder ist es, sobald man in die Branche
114 reinkommt, weiß man das einfach, gibt es da aktiv irgendetwas drüber oder ist einfach so ein
115 Nebenwissen, was man einfach so erlangt?

116 **B:** Das ist eigentlich immer nur dann Thema, wenn es in der Presse ein Thema ist. Sonst ist es
117 dadurch, dass wie gesagt die Mengen ja relativ gering sind, und pro Anlage vielleicht mit
118 einer halben Tonne auskommen und wir davon kaum Anlagen im Feld sehen, und im
119 deutschen Markt so gut wie gar nicht, ähm, sind wir auch jetzt nicht so oft in der Berührung
120 da, dass wir da ständig mit in Berührung sind. Wir machen das über unsere Pressestelle, da
121 kommt öfter mal was aus der Presselandschaft zu dem Thema, ähm, aber es ist jetzt wirklich
122 kein großes Thema. Als ich in der Branche angefangen hab, das war 2003, da hatte ich davon
123 noch gar nichts gehört, dass das in der Windbranche Thema ist. Also erst hier im Verband
124 (lacht), ja, das ist glaube ich, wie gesagt, dadurch, dass alle anderen, die ich besichtigt habe
125 und all Anlagen, an denen jemals dran war als Techniker, war ich nicht einmal an so einer
126 Anlage dran, in der so ein permanenterregter Generator drin war. Das ist eher selten, ich war
127 jetzt nicht offshore, aber onshore ist das total selten. Und deswegen ist das auch nicht so unser
128 Thema. Unsere Mitglieder, Enercon als Großmitglied, Senvion, Nordex, die setzen das wie
129 gesagt so gering ein, dass das auch über so eine normale Pressestellungnahme kein weiteres
130 Thema ist.

131 **A:** Aber es ist interessant, ich hab mal grundsätzlich recherchiert und ich habe tatsächlich
132 auch eine Dokumentation gefunden, die war vom NDR, ich glaube das war schon 2013, und
133 das ist auch öffentlich-rechtlicher Rundfunk, dem vertraue ich mit Sicherheit auch, aber es ist
134 natürlich auch so aufgemacht, dass es ein bisschen größer und gefährlicher wirkt, habe ich
135 jetzt zumindest so subjektiv empfunden, als es ist.

136 **B:** Ja, das ist natürlich immer eine Sache, von welcher Richtung man das sieht. Presse ist
137 Presse und, ähm, gerade in einer Branche, die für sich schon in Anspruch nimmt, eher auf der
138 nachhaltigen und ökologischen Seite zu stehen, muss man sehen, dass das anscheinend so ist,
139 man muss sich dann auch solcher Kritik stellen können. So, und insofern ist es natürlich
140 relativ leicht auch, äh, für die Presse da die Finger in die Wunde zu legen. Aber an sich ist es
141 ja auch gut, man befasst sich dann mit dem Thema und wie gesagt es gibt Hersteller, die sich
142 dann der Ökobilanzen auch extra annehmen und auch transparent damit umgehen. Aber die
143 Branche ist, wenn man die mit anderen Industrien vergleicht, ja wirklich echt jung, also
144 richtig Industriebranche würde ich sagen, ist vielleicht seit 20, 25 Jahren höchstens und das ist
145 für eine Industrie so ganz neu, muss man einfach sagen. Und natürlich, um gerade die
146 Hersteller die mit Thema öfter von der Presse konfrontiert wurden, die auch so etwas gar
147 nicht einsetzen, die sind dann auch einfach überfragt, natürlich nimmt man dann immer gleich
148 den Branchenprimus Enercon und die sagen „tut uns leid, setzen wir nicht ein“. Vestas
149 natürlich ja, die setzen das ein, aber nur in homöopathischen Mengen und nur offshore. Also
150 da läuft auch so ein armer Journalist gegen die Wand. Das ist natürlich schwierig. Also wie
151 gesagt: wir machen eigentlich über diese Pressearbeit hinaus eigentlich nichts. Also wir haben
152 jetzt keine Studien in Auftrag gegeben oder so.

153 **A:** Und bezüglich, das war vorhin schon kurz Thema, ähm, Lebensdauer sind ja so 20 Jahre
154 oder wird jetzt versucht auch ein bisschen zu verlängern, aber die Zeit ist ja jetzt praktisch,
155 also Recycling ist aktuell, gibt es da was speziell was zu den seltenen Erden wie die recycelt
156 werden?

157 **B:** Hab ich gar nichts, ähm, also die Anlagen, die ja jetzt diese 20 Jahre geknackt haben, also
158 im Endeffekt sind es Anlagen, die jetzt älter sind, die werden Ende 2020 aus dem
159 Fördersystem des EEGs rausfallen, also mit 31.12.2020 ist Ende für die Anlagen, die bis ins
160 Jahr 2000 gestellt wurden, also in den Neunzigern haben Sie so bis zur 500-600
161 Kilowattklasse (...). Ein großer Anteil dieser Anlagen wird dann nicht mehr betrieben werden,
162 es gibt keine Förderung mehr. Und der freie Marktpreis der ist so zwischen 2-3 Cent pro
163 Kilowattstunde an der Börse, schwankt und für 2-3 Cent ist es schwierig so eine Anlage dann
164 wirtschaftlich zu betreiben. Also dazu sind einfach die Servicekosten zu hoch. Natürlich kann
165 man sagen „ok“, die haben eine Förderung bekommen über 20 Jahre, aber auch
166 konventionelle Kraftwerke, darf man nicht vergessen, für die sind 2-3 Cent auch nicht
167 auskömmlich. Insofern scheuen wir uns da auch nicht mit anderen Branchen uns messen zu
168 müssen, aber die anderen werden dann eben abgebaut. Und wenn sie abgebaut werden, bei
169 den Anlagen finden Sie eben noch kein Neodym, das sind Onshoreanlagen, Offshore gab es
170 da noch so gut wie gar nicht, und, äh, das wird wahrscheinlich frühestens in den nächsten 15
171 Jahren Thema sein. Also Anlagen, die in den nächsten 10 Jahren abgebaut werden, da werden
172 Sie wahrscheinlich kein Neodym drin finden oder andere seltene Erden. Natürlich finden Sie
173 mal andere seltene Erden drin, ich weiß nicht, was alles im Umrichter verbaut wird, obwohl,
174 also die großen Transistoren wenn Sie so wollen, äh, sind sehr Silizium basiert, da gibt es
175 wahrscheinlich auch noch kleinere Mengen an anderen seltenen Erden, aber das sind dann so
176 geringe Mengen, da weiß ich gar nicht, also es gibt da zumindest keine etablierten, derzeit
177 genutzten Recyclingstrukturen, soweit ich weiß. Also das ist mir nicht bekannt.

178 **A:** Wissen Sie etwas über die, z. B. Vestas, auch wenn die nur sehr kleine Mengen, äh, von
179 seltenen Erden kaufen, wie sie das kaufen oder wo, China wahrscheinlich?

180 **B:** Weiß ich leider auch nicht. Ähm, Vestas produziert ja einige Anlagen hier,
181 beziehungsweise teilweise auch in Dänemark, ähm, und müsste man natürlich erfragen, ich
182 weiß es ehrlicherweise nicht. Ich weiß auch nicht wie da die Marktsituation aussieht, also wie
183 die Beschaffungswege sind.

184 **A:** Aber war das Thema, so 2011, hat man da aufgehört, als es in China eine Bewegung gab
185 oder war das auch nicht merkbar?

186 **B:** War kein Thema, weil die Nachfrage für solche Anlagen auch nicht da war. Also gerade
187 Vestas z. B., die jemand sind, die seltene Erden einsetzen, also permanenterregte Generatoren,
188 ähm die hatten zu der Zeit vier Anlagen der klassischen Bauweise zu liefern für
189 Offshoreparks von ENBW, Baltik I, Baltik II und der 3.6er-Anlage, da stehen jetzt 80
190 Anlagen und die müssen sie ja auch erst mal produzieren und, ähm, also die hatten jetzt kein
191 Problem, dass sie plötzlich irgendwie einen Engpass erlebten. Dazu war die Nachfrage nach
192 Neodym auch nicht da. Wie es bei Siemens war weiß ich nicht, jetzt mit den Offshoreanlagen,
193 ich weiß auch nicht wie groß die Mengen sind, die da verbaut wurden in der SWT 4.0 und
194 6.0, das müsste man bei Siemens mal rausfinden, das weiß ich nicht. Also die bei Siemens
195 sind noch die, die am meisten davon verbauen, würde ich sagen.

196 **A:** Ich hab mir auch mal angeschaut die Anlagen auf deren Website oder die Größenordnung
197 und Offshore eben, genau, das wäre ja auch interessant. Ähm, genau, das hatten wir eigentlich
198 eben schon geklärt, seit wann dieser Zusammenhang eben bekannt ist, ähm, zwischen
199 Windkraftanlagen und seltenen Erden, das kriegt man eben so mit. Ähm, genau, Einblick in
200 Herstellung, Betrieb, oder beziehungsweise Planung, da hatten wir ja eben schon drüber
201 gesprochen oder die Kosten kann man ja grundsätzlich sagen, haben Ihrer Meinung nach
202 keinen sonderlichen Einfluss auf die Produktion, weil es eben sehr geringe Mengen sind.

203 **B:** Die Kosten, wir können ja hier mal beim ersten Punkt vorne anfangen, ähm, die Kosten in
204 der Planung sind irrelevant, weil sie die Windkraftanlage planen, beziehungsweise die
205 Konstruktion, da planen Sie mit relativ standardisierten Kosten für die Anlage, da ist es
206 manchmal auch unerheblich, welche sie nehmen. Manchmal wird auch, weil die Planung so
207 lange dauert oder weil das Genehmigungsverfahren so lange dauert, teilweise umgeplant und
208 eine andere Anlage genommen, wenn Sie nach sieben Jahren irgendwie merken, jetzt kriege
209 ich hier meine Genehmigung, und die Anlage, mit der ich geplant habe, die wird gar nicht
210 mehr produziert oder die ist überholt, ähm, da ist der große Kostenfaktor eher die Planung an
211 sich und die emissionsschutzrechtlichen Belange zu erfüllen, also die ganzen
212 Umweltverträglichkeitsprüfungen und so. Dieser ganze planungsrechtliche Teil, der ist so
213 teuer und aufwendig, dass in der Planungsphase, das irrelevant ist, also da berücksichtigt wohl
214 auch kein Finanzierer wie grad die Marktsituation bei Neodym ist. Ähm, bei der Herstellung
215 kann ich mir vorstellen: natürlich ist es so, aber..

216 **A:** Etwas komplexer, wenn ich das richtig verstanden hatte, eben anders als eine Spule
217 aufzuwickeln.

218 **B:** Genau, es ist halt etwas, ähm, also wenn Sie die Mengen, die ja in der Windenergiebranche
219 so produziert werden, es ist ja zum Teil nicht vergleichbar mit der Automobilindustrie, Sie
220 haben ja da einen deutlich geringeren Automatisierungsgrad, das ändert sich jetzt zwar so
221 langsam, aber der ist immer noch geringer als in anderen Branchen. und, Ähm, es ist halt
222 wirklich auch Schwermaschinenbau und da kann man nicht einfach mal eine neue halle
223 daneben setze, um für relativ homöopathische Mengen eine Anlage zu installieren, die
224 komplett andere Bauweisen herstellt, insofern ist das ein relativ langer Prozess auch für so ein
225 Unternehmen eine Entscheidung zu treffen: wir bauen jetzt mal ein anderes Generatorkonzept
226 hier auf parallel zu dem bisherigen. Aus Kostengründen muss man dabei sehr genau abwägen
227 und, äh, da ja der Bedarf im Onshorebereich, auf den sich viele Hersteller ich sage mal
228 spezialisiert haben, nicht, oder es keinen wirklichen Vorteil gibt für eine permanenterregte
229 Anlagen aus Kostensicht, hat die wenige Nachfrage dazu geführt, dass da auch nicht so
230 schnell sich bei den Herstellern da in der Richtung was getan hat, sondern die Mehrkosten

231 können dann eher so Firmen wie Siemens oder Vestas, ähm, stemmen. Und Siemens hat es ja
232 auch getan, indem sie dann wirklich auch viel Nachfrage dafür im Offshorebereich hatten und
233 die daraufhin aufbauend dann dieses Konzept entwickelt haben dieser DD-Anlage, also dieser
234 direktangetriebenen Anlagen, weil sie für den Offshorebereich, da ist die Nachfrage wirklich
235 nach weniger Serviceeinsätzen, nach geringerem Risiko und, ähm, da ist das Risiko eines
236 Ausfalls eines Generators natürlich geringer, sagt man, ob das so ist, muss jetzt die Zeit
237 zeigen echte Zahlen habe ich da bis jetzt noch nicht gesehen. Das Fraunhofer IWIS, die
238 machen immer so eine Schadenstatistik, in welchen Bereichen gibt es welche Schäden und in
239 der Regel gibt es bei den elektrischen Komponenten einen großen teil der Schäden in so einer
240 Anlage, die allerdings nicht so kostenrelevant sind, weil Sie die schnell beheben können, mh,
241 anders ist es halt beim Getriebe, ein Getriebeschaden führt in der Regel zu sehr hohen Kosten
242 und offshore zu noch höheren Kosten, weil der Austausch noch deutlich, deutlich
243 aufwendiger ist als onshore, deswegen ist man dann offshore dazu übergegangen und überlegt
244 eher die getriebe lose Anlage zu installieren, die, ähm, etwas einfacher aufgebaut ist auf den
245 ersten Blick mit permanenterregtem Generator. und dann Vollumrichter, also der gesamte
246 vom Generator erzeugte Strom wird mittels Umrichter auf genau die Netzqualität gebracht,
247 die ich brauche, das ist auch kein Problem. Also früher die Anlagen so bis 2005, 2010 so, die
248 dann schon Umrichter hatten, also nicht mehr das dänische Konzept, da wurde ein Teil von
249 30% dann, ähm, über den Umrichter geschickt und der Rest wurde immer noch direkt über
250 das Netz geschickt und bei einem permanenterregten Generator da müssen Sie einen
251 Vollumrichter haben, der Umrichter ist etwas teurer und größer, auch das muss man in
252 Kostenüberlegungen miteinbeziehen, obwohl es heute wiederum nicht ganz so relevant mehr
253 ist, weil eigentlich alle Anlagen so einen Vollumrichter haben, weil die
254 Netzananschlussbedingungen und die Netzanforderungen so hoch sind. Also an 50 Hertz und
255 Spannungshaltung und das können Sie eben nur mit einem Vollumrichter sicherstellen.

256 **A:** Und grundsätzlich zur Effizienz, das habe ich oft gelesen, dass diese Permanentmagneten
257 den Generator, das Ganze eben so effizient machen, gibt es dazu auch Studien oder ist das
258 wirklich so, dass das offshore so viel ausmacht? Oder kann die Enercon jetzt mit ihren
259 Kupfer- und Aluminiumteilen genauso effizient sein?

260 **B:** Also das ist eigentlich kein Unterschied, das ist wie gesagt auch eine Frage der
261 Anlagenkonstruktion, also dieses Thema bei der Enercon mit dem vielen Kupfer hat eben bei
262 dieser größeren Skalierung von den Anlagen, von damals E40 bis heute, was weiß ich, E830,
263 führt natürlich auch dazu, dass die Sie Gewicht haben und irgendwann, die müssen das Zeug
264 über die Straße transportieren, Sie haben bestimmte Brückentraglasten, die Sie nicht
265 überschreiten dürfen und so weiter, aus diesem ganzen Logistikbereich kam dann auch die
266 Anforderung: Leute, ihr dürft nicht einfach mal die Anlage größer skalieren, wir müssen da
267 unbedingt uns was überlegen und, ähm, man versucht dann natürlich das Gewicht
268 einzusparen. Wenn Sie permanenterregte Anlagen haben, sparen Sie eine Menge Gewicht, das
269 ist so, weil Sie eben nicht ganz so viele Wicklungen brauchen Sie haben die relativ dünnen
270 Magnetplatten, die Sie darauf verteilen, von knapp einer Tonne, ich weiß nicht genau, was
271 jetzt so ein Synchrongenerator bei der Enercon wiegt, aber es ist schon deutlich mehr. Ähm,
272 es gibt allerdings bei der Vestas-Anlage, das habe ich vergessen, auch ein Getriebe, also die
273 hat einen permanentmagnetenerregten Generator und trotzdem ein Getriebe. Das schließt sich
274 jetzt nicht aus. Ist ja nur eine Frage wie ich den Generator ausgestalte, also im Dynamo haben
275 Sie jetzt kein Neodym, aber auch einen Permanentmagneten drin, der sozusagen das
276 Magnetfeld im Statorkreis induziert, insofern ist egal: mit Getriebe oder ohne, aber das ist
277 zumindest bei Anlagen, die kein Getriebe haben, ein Generator, der einen viel größeren
278 Durchmesser hat und dadurch machen sich die Materialkosten natürlich deutlich schneller
279 bemerkbar und wenn Sie dann Magnete einsetzen, sparen Sie natürlich wirklich an Masse,
280 also konstruktiv. Insofern kann es konstruktiv schon ein Vorteil sein, wenn Sie den Rest der

281 Anlage so auskonstruieren, dass Sie halt sparen. Deswegen ist diese Siemens-Anlage auch
282 anders konstruiert.

283 **A:** Und die brauchen dann entsprechend weniger von den anderen Metallen?

284 **B:** Die brauchen natürlich weniger Kupfer, weniger Aluminium.

285 **A:** Wieder eine Einsparung.

286 **B:** Vollumrichter haben sie dann wie gesagt alle. Und, äh, die großen Gewichte kommen dann
287 beim Umrichter, beim Turm, bei der Gondel zusammen, da ist der Generator ja nur ein Teil
288 davon. Und, ähm, das Gesamtkonzept „mit Getriebe“, „ohne Getriebe“, ähm, hat man
289 manchmal auch den Eindruck dass die Hersteller ein bisschen probieren, wie gesagt Vestas
290 jetzt mit den permanentenregten Generator und trotzdem Getriebe. Ähm, mal gucken, wo die
291 Reise hingeht, ich vermute mal in dem Offshorebereich wird sich die getriebelose Anlage
292 wirklich durchsetzen, aber das ist eine Vermutung, die wir hier haben und die muss nicht
293 unbedingt eintreten. Aus logistischen Gründen im Service, weil so ein Getriebewechsel
294 offshore echt extrem teuer und aufwendig ist und Sie dann so eine Stellschraube haben, um so
295 einen Fehler auszuschließen. Im Onshorebereich muss man gucken wie sich die Preise
296 entwickeln, also da ist es wirklich eine Frage wie die Hersteller die Preise gestalten vor dem
297 Hintergrund der Ausschreibungsthematik da ist der Kostendruck schon deutlich größer, aber
298 das kann ich echt nicht beurteilen wie da die interne Kostenstruktur ist und das kann man
299 versuchen bei den Herstellern zu erfragen - aber wird schwierig.

300 **A:** Ja, das glaube ich auch, Und als persönliche Einschätzung eben genau auf die Faktoren,
301 ähm, wie wäre da Ihre Einschätzung: werden die seltenen Erden eher verschwinden aus der
302 Windenergiebranche oder wie wird man sie beseitigen?

303 **B:** Also jetzt in nächsten Zeit, es hat erstangefangen mit dem Einsatz seltener Erden, solche
304 Anlagen, die solche Permanentmagnete im Generator haben, die gibt es ja noch nicht so lange
305 und, ähm, man beobachtet noch also die sind relativ neu. Müsste man mal gucken, seit wann
306 die Siemens 4.0er gebaut wird, ähm, das ist noch nicht so lange und die müssen jetzt erst mal
307 20 Jahre laufen und dann recycelt werden.

308 **A:** Damit erübrigt sich das ja auch, weil es würde mich genauso interessieren wie geht man
309 dann damit um nach 20 Jahren, da hat man nun diese Magneten, was macht man damit, es
310 interessiert jetzt wahrscheinlich noch keinen wie das in 20 Jahren ist.

311 **B:** Das ist eben auch die Frage wie sind die danach die Magnete. Also je nachdem wie stark
312 die thermische Belastung war, desto unterschiedlicher ist dann eben auch deren
313 Magnetisierungsgrad am Ende. Also in dem Bereich kann ich nicht mit Wissen aufwarten,
314 ähm, da muss man irgendeinen Maschinenbauingenieur fragen, der sich mit diesen Magneten
315 auskennt, aber da muss man einfach sehen wie ist der „Verschleiß“, ähm, der Magnete, weil
316 sonst wäre es ja kein Problem die wieder einzusetzen, weil die ja nicht mechanisch
317 verschleifen, das ist kein Problem. Bei einem normalen Generator mit Wicklungen ist das
318 generell kein Problem, weil Sie haben ein sehr reines Metall, ob Kupfer oder Aluminium und,
319 ähm, das Recycling ist wie gesagt seit Jahrzehnten etabliert, da gibt es jetzt auch keine
320 anderen innovativen Möglichkeiten das zu recyceln, sondern Sie haben das Metall und das
321 wird eingeschmolzen und wiederverwendet. Und das ist bei Aluminium, wenn es dann erst
322 mal da ist, auch nicht so schlimm, weil der Energieaufwand zwar relativ hoch ist bei
323 Aluminium, aber, ähm, der Bauxitabbau an sich eher das Problem darstellt als nachher das
324 Recycling vom reinen Aluminium.

325 **A:** Und wie Sie anfangs ja schon gesagt haben wie es auch gerade bei den großen deutschen
326 Herstellern ist, die selber viel aus der Herstellungskette selbst machen, können sie
327 wahrscheinlich auch viel Recycling selbst machen, planen die das mit ein?

328 **B:** Weiß ich ehrlich gesagt nicht, ähm, ist mir bis jetzt auch nicht bekannt, ich weiß, dass die
329 Hersteller aber selbst Anlagen abbauen und Komponenten wiederverwenden, also das ist dann
330 noch kein Recycling, aber im normalen Service ein Getriebe wird dann eben überarbeitet und
331 wieder eingebaut in einer Anlagen und das betrifft auch den Generator und alle anderen Teile.
332 Außer natürlich beim Fundament oder so, ähm, bei Betonteilen geht es natürlich nicht, aber
333 bei allen Maschinenbauteilen die werden dann in der Regel vom Hersteller inhouse bearbeitet,
334 aber es gibt jetzt keinen reinen Recyclingprozess wie Sie das jetzt wahrscheinlich meinen,
335 also dass da irgendwie ein neues Produkt draus wird, also bis jetzt kenne ich das nicht.

336 **A:** Also ich glaube das ist auch wirklich auch noch ganz am Anfang, zumindest, was ich
337 davon gelesen hab, fängt das jetzt erst an, es gibt einige Studien und Artikel dazu, aber es
338 scheint wirklich noch in den Kinderschuhen zu stecken und „Urban Mining“ ist immer so ein
339 großes Ding, ist natürlich einfach, immer auf die Windkraftanlagen zu zeigen, in Wirklichkeit
340 hat es jeder in seinem Smartphone.

341 **B:** Theoretisch gibt es das ja überall, aber bei Großkomponenten, hatte ich ja anfangs gesagt,
342 ist ja eine Branche, die einen gewissen Idealismus vor sich herträgt, muss man dem sich auch
343 stellen. Das bleibt nicht aus. Insofern wäre es für Sie vielleicht einen Versuch wert, bei den
344 Herstellern zu erfragen wie die mit dem Thema Ökobilanz umgehen. Bei Vestas weiß ich,
345 dass Sie da wahrscheinlich eine Info kriegen werden, bei den anderen weiß ich es nicht. Da
346 hab ich jetzt noch keine Berührungspunkte mit dem Thema gehabt.

Interview Nr. 4

Termin: 16.05.2018
Dauer: 22:00 Min. (netto)
Interviewerin A: Nomi Parnitzke
Interviewpartner B: Ingenieur (ehemals bei großem, deutschen Windkraftanlagen-hersteller tätig)
Unternehmen: Ingenieurbüro/ Beratung für Windenergie
Kontakt: über Wolf Stötzel (BWE)

1 **A:** Haben Sie zunächst einmal vielen Dank für Ihre Bereitschaft für ein Interview. Gern
2 würde ich anfangs von Ihnen wissen, welche Beziehung Sie zu erneuerbaren Energiesystemen
3 haben bzw. in welchem Bereich Sie arbeiten.

4 **B:** Ich arbeite in einem Ingenieurbüro spezialisiert auf die Entwicklung und Konstruktion
5 von Windkraftanlagen. Ehemals war dies ein Herstellerunternehmen, das sich vor einigen
6 Jahren aufgelöst hat. Wir arbeiten mit bekannten großen Herstellern zusammen, die
7 Generatoren und Windkraftanlagen herstellen. Ich selbst bin Maschinenbauingenieur und kein
8 Elektroingenieur, daher muss ich sehen, inwieweit ich ihnen bei Permanentmagneten mit
9 technischem Wissen weiterhelfen kann. Die Entwicklung der Permanentmagneten habe ich
10 allerdings verfolgt in den letzten Jahren.

11 **A:** Wie präsent ist das Thema seltene Erden in Ihrem Tätigkeitsbereich grundsätzlich? Haben
12 Sie schon Fachartikel dazu gelesen, sich mit Kolleg/innen/ Geschäftspartner/innen darüber
13 ausgetauscht oder waren seltene Erden auf Tagungen schon Thema?

14 **B:** Auf Tagungen wurde das Thema eventuell schon angesprochen und Artikeln habe ich
15 darüber auch schon gelesen. Dabei geht es oft um die philosophische Frage, woran man
16 glaubt: an den Direktantrieb oder das Getriebe. Aber das Hauptthema ist dabei die
17 Kostenentwicklung, die Umwelt wird nicht so sehr angesprochen. Die Kostenabhängigkeit
18 vom chinesischen Markt besteht eben.

19 **A:** Und was wissen Sie über die Lebenszyklen von seltenen Erden in der Verwendung und
20 deren Entsorgung oder möglichen Wiederaufbereitung bzw. Recycling?

21 **B:** Die Anlagen selbst sind so auf 20 bis 30 Jahre ausgelegt, die älteren eher auf 20 und die
22 neueren eher auf 30. Aber ansonsten kann ich dazu nicht viel sagen. Auch von dem Recycling
23 weiß ich nichts. Was ich nur mal gehört habe ist, dass seltene Erden ein massives
24 Korrosionsrisiko haben, sie korrodieren im Betrieb deutlich schneller als andere Materialien
25 und halten dementsprechend nicht so lange. Aber das muss natürlich noch länger beobachtet
26 werden, um es besser zu beurteilen.

27 **A:** Ach, das ist sehr interessant, davon habe ich auch noch nichts gehört. Jetzt hätte ich noch
28 eine Frage zur Herkunft: welche Rolle spielt die Beschaffung von seltenen Erden im
29 Unternehmen?

30 **B:** Die seltenen Erden kommen bei Windkraftanlagen vor allem aus China, denn die aus
31 anderen Abbaugebieten sind zu teuer. Da gibt es eine Grenze, bis zu der die Preise in China
32 steigen müssen, damit sich der Abbau in Kanada, Australien, den USA und so weiter rentiert;
33 Maximalpreise sozusagen. Aber bei den Herstellern ist es so, dass die meisten
34 vorkonfektionierte Generatoren für ihre Anlagen kaufen und da wird der Permanentmagnet
35 fertig zum Einbau angeliefert.

36 **A:** Kennen Sie die aktuelle Marktsituation der seltenen Erden - wird diese in Ihrem
37 Unternehmen diskutiert?

38 **B:** In unserem Unternehmen haben wir uns bewusst gegen seltene Erden entschieden und
39 zwar aufgrund der Kostenproblematik, da ist die Unsicherheit einfach zu groß. Denn das
40 Kostenproblem gibt es nach wie vor. Deshalb war das nie ein Thema für uns. Natürlich gibt es
41 die großen Hersteller wie Goldwind und Siemens, die Permanentmagneten einsetzen, die
42 dann fast nur aus China kommen. Aber wir machen das anders.

43 **A:** Wie ist das, wenn man in dieser Branche ist, kriegt man von dem Thema seltene Erden
44 einfach irgendwann mit oder seit beschäftigen Sie sich mit dem Zusammenhang zwischen
45 seltenen Erden und Windkraftanlagen bzw. seit wann ist Ihnen der Zusammenhang eigentlich
46 bekannt?

47 **B:** Also das erste Mal war schon vor 2000, da fing das mit den Permanentmagneten an. Denn
48 das ist klar: die haben technisch super Eigenschaften. Nach 2000 haben dann immer mehr
49 Hersteller begonnen, darüber nachzudenken. Das hing vor allem mit der Nutzung von
50 Neodymzusammen.

51 **A:** Auch wenn Sie nicht direkt ein Hersteller von Windkraftanlagen sind - haben Sie einen
52 Einblick oder eine Ahnung davon, inwiefern die Verwendung von seltenen Erden in der
53 Planung, Herstellung und dem Betrieb höhere Kosten verursacht verglichen mit
54 herkömmlichen Systemen? Ich habe z. B. schon gehört, dass die Herstellung dieser
55 Permanentmagnet betriebenen Generatoren deutlich komplexer sei als die „normaler“
56 Generatoren aus Aluminium beispielsweise.

57 **B:** Naja, das würde ich nicht sagen. Das mit den Permanentmagneten ist eigentlich eine sehr
58 einfache Technik, weniger Teile und so. Aber dafür ist es montagetechnisch sehr komplex.
59 Das ist ein riesiger Magnet, der wird auf ganz bestimmte Art und Weise gesetzt. Der
60 Permanentmagnet erzeugt eine riesige Spannung und der Umrichter für das Feld muss erst
61 mal freigeschaltet werden. Und der Magnet darf erst freigeschaltet werden, wenn er optimal
62 ausgerichtet ist. Die Permanentmagneterrichteranlage hat ein ganz schönes Sicherheitsrisiko
63 aufgrund der Spannung, sonst ist das aber nicht weiter komplex.

64 **A:** Denken Sie, dass die unter Umständen recht starken Preisanstiege oder -schwankungen
65 seltener Erden den Betrieb von Windkraftanlagen beeinflussen?

66 **B:** Also das macht wenn nur bei den großen Generatoren Sinn. Bei schnelllaufenden
67 Systemen ist es gar nicht sinnvoll, seltene Erden zu verwenden. Enercon hat sich schon früh
68 dagegen entschieden, die haben allerdings Lagerwey gekauft und die haben solche
69 Permanentmagnet-betriebenen Anlagen. In Europa, würde ich sagen, ist die Tendenz aber
70 dahingehend, dass seltene Erden eher nicht eingesetzt werden. In China werden sie ja
71 subventioniert: die haben einen Wettbewerbsvorteil. In Europa gibt es fast nur
72 mittelschnelllaufende Systeme, Vestas setzt seltene Erden jetzt neu ein, aber noch nicht in
73 vielen Anlagen. Auf Dauer ist die Entwicklung aber unklar.

74 **A:** Ok, und wo sehen Sie persönlich die größten Chancen oder auch Schwierigkeiten: in der
75 Beschaffung, Wiederaufbereitung oder der Entsorgung seltener Erden?

76 **B:** Da hab ich leider überhaupt keine Ahnung, wenn es ums Recycling geht.

77 **A:** Das ist gar kein Problem - das Thema wird ja wahrscheinlich auch erst in den nächsten
78 Jahren und Jahrzehnten aufkommen, wenn die ersten Anlagen, die seltene Erden im Generator

79 enthalten, abgebaut werden. In welche Richtung wird sich der Einfluss seltener Erden auf
80 erneuerbare Energiesysteme Ihrer Meinung nach auf lange Sicht hin entwickeln? Eher
81 Richtung Substitute, andere Produktionsstätten, politische Restriktionen oder Recycling?

82 **B:** Über Substitute wird nachgedacht, aber bisher hat man keine guten Stoffe gefunden, denn
83 die Energiedichte ist nicht stark genug verglichen mit den Permanentmagneten. In kleinen
84 Mengen ist die Verwendung seltener Erden ja kein Problem, auch kostentechnisch. Aber bei
85 400 bis 500 kg für große Generatoren würde man schon darüber nachdenken. Ich glaube
86 allerdings nicht, dass sich die seltenen Erden auf Dauer durchsetzen.

Interview Nr. 5

Termin: 17.05.2018 in Canterbury (University of Kent)
Dauer: 49:24 Min. (netto)
Interviewerin A: Nomi Parnitzke
Interviewpartner B: Emmanouil Apergis
Unternehmen: University of Kent
Kontakt: über Fachartikel, persönlich

1 **A:** First of all, I am going to introduce the topic of my master's thesis: I am trying to find out
2 whether rare earths themselves or their prices have an influence on the costs of renewable
3 energy systems. During my work I have focused on wind energy mainly because I think this
4 is one of the biggest industries, they produce most of the renewable electricity, ehm.

5 **B:** And this motivated you by the policy of the European Union. They say we need to reduce
6 carbon emissions or, eh, carbon dioxide. As energy industries mainly focus on coal, using
7 energy from coal or oil

8 **A:** Nuclear energy as well, still.

9 **B:** I would say industries mainly are facing the times that diversify the portfolio, eh, and you
10 can see that recently industries are expanding their renewable resources which demands rare
11 earths because the wind turbines having permanent magnets out of rare earths. Of course not
12 all them are having - some of them are trying to stay away from the rare earth industry and the
13 monopoly of China. The question is: are these wind turbines better than the ones with the rare
14 earths, more efficient or not. Not only efficient in their span of life. But this up to the
15 manufacturers.

16 **A:** And it is still a very new industry this is why. It only began in the 1908s and they say there
17 is a lifespan but still also recycling will only be subject in, let's say, 10 - 15 years, so, there is
18 not so much information on that yet. Ehm, how come or how did you find out about that topic
19 or the relation between renewable energies and rare earths?

20 **B:** This is a funny question because I was doing a research in finance with one of my
21 colleagues and we were focusing on volatility prices affected by terrorists. So this was one of
22 my first researches and while I was doing that somehow I bumped into an article mentioning
23 the rare earths industry in Afghanistan. I know it is strange, eh, because ever since I have not
24 heard anything about the rare earth industry in China. So I was wondering whether there was
25 something I could do, mainly in price volatility. And I decided not to disregard the article and
26 read it in my free time and this is what I did. So I kept the rare earths in mind and in the future
27 of a couple of months I googled it: so what are these rare earths and then: "boom" in a tiny
28 world and I was interested.

29 **A:** So, would you say, ehm, especially like one of your articles that your work contributes to
30 the green revolution somehow or would you say your work is kind of in favor of renewable
31 energies by doing research in that area?

32 **B:** The thing is that, at this point of time, right now today, 17th of May, we have a negative
33 view on rare earths because they are controlled by China, which is wrong in my opinion. Our
34 view of having a negative view is wrong not because of China. Because of viewing this not as
35 an opportunity, we are thinking of "oh, how are we gonna squeeze more rare earths from
36 Chinese soil without having them to block our way. So, instead of thinking of opportunities,
37 of alternatives, of investments, we are thinking of going to the World Trade Organization and

38 say “oh, Mr. Trump, please retaliate block their steel industry”, so, the aluminum industries, it
39 definitely goes political and that is the role of science to avoid political frictions and find new
40 solutions. That’s why I’m saying - no, back to the questions that is about the revolution. I
41 believe that exploiting the rare earths is like the new Eldorado, for example you might have
42 noticed the ERECON report by the European Union stresses the problem of Chinese
43 monopoly but completely stays away from that problem and focuses on how we should
44 proceed from this point on. I assume that there of course will be a monopoly on the other side.
45 What we should do provide sustainability and for what: both the Chinese and the Europeans.
46 Consumers around the world, that’s what I mean with sustainability, the purpose of
47 sustainability. And this Eldorado for rare earths has started in EU (...people coming in)

48 **A:** Ok, thank you, and, this is how you came across rare earths, ehm, have you talked about
49 that topic with other researchers or colleagues, is that something, you think, is really up-to-
50 date in science?

51 **B:** I believe that, currently in organization and management and organization people have no
52 clue what’s going on. Eh, maybe in policy, in policy journals they have, they already know
53 that but beyond that field in mineralogy, they have completely no clue of what’s going on So,
54 the thing with economics is that they live in their own world around central banks and
55 everything has to do with visible state or the government, the state is directing industries is
56 directing the behavior of prices and the way it is with variables. And they are neglecting that
57 the world around them is changing. So we need to think differently, think of how the political
58 decisions in specific parts of our resources are actually forcing changes in macro economical
59 environments and not the other way around. We are trying like to manipulate, eh, a
60 mathematical version of the economy instead of focusing at the heart of the economy which is
61 the industry. Industry itself should be what drives economy and then all the other variable
62 follow. This is my opinion of course. Oh, sorry, you said that whether I have discussed that
63 with other colleagues. In economics I’m me and my colleague because that kind of work I’m
64 with my father, eh, even my father was ignored in that but because my first degree was in
65 geography and my second degree is in international relations, I have that kind of supervision
66 of all things so I think of economy as one part of the equation and not the equation. And that’s
67 why I will convince them that there is something there, something really important. Currently
68 not much but in the future it will be the next old generation, for example, eh, we are
69 discussing now about the oil prices in 1972 and we’re thinking of how important is oil and
70 how the oil prices affected other economical variables. Today it has not happened, even when
71 China spike their prices. in 2010, still, I don’t think this is the complete picture, we have not
72 seen yet a real crisis by the rare earths. Probably, if we have not diversified our sources in
73 Europe, or Europe and Brazil, mainly Brazil, and India or Russia, if we have not diversified
74 our sources, China will say, ok, I will behave like OPEC, the oil cartel, because what I see is
75 that my resources for the future are depleting and they are right, that is first, And the second
76 one is that the environmentally structure is massive in China, we have absolutely no idea
77 what’s going on their, but

78 **A:** What I have read is that it is rally complex to get these rare earth elements resources and
79 that you have a lot of processes, a lot of steps and in case Europe would like to produce them
80 as well, if they had sources that were big enough, they would need to build up the whole
81 industry and I believe or as I understand, that is a huge thing in infrastructure and would take
82 many years and specialists to build as well. Because it’s not like building and someone is
83 working there but it’s a huge thing, this is what I imagine it to be like.

84 **B:** China has been investing a lot in rare earths but people are thinking there is a policy from
85 China to control the globe by controlling the rare earths and they say that China has invested a

86 lot to become China first and now that America is first it will be America second, this is
87 completely bullshit. Because, I will let you know how China has come to these policies and
88 there is no conspiracy behind it. It's about combating poverty for China - it's a totally
89 different story, I think people who say that kind of geopolitical dogmatic from China it will
90 go to this kind of area, in Waikuang Town Lake, which are at the borders of Mongolia. These
91 are where the main mines are located, this is a massive complex, the entire area is the rare
92 earths industry, it's, I would say, because rare earths industry is wrong in China, iron
93 extracting industry. Because rare earths extracting is very expensive, the profits they receive
94 from selling the iron they boost like a circle, they boost their rare earths processing so this is
95 like a circle, otherwise, focusing solely on enrichment is not very profitable, this is a benefit
96 they receive from this kind of extraction. So, the outcome is this massive, toxic, full of
97 radiation lake Baotou. The entire environment is corrupted, a massive lake of radiation. It was
98 on the Guardian even.

99 **A:** Do you know anything about the recycling or disposal of rare earths yet, a lot of scientific
100 articles are very much into chemistry or physics and rather hard to understand, have you ever
101 heard of the recycling of rare earths or what they do after they have used them, do they
102 dispose it somehow or is it always reused?

103 **B:** Usually, eh, this kind of recycling processes is explained very good in the ERECON
104 Policy from the European Union. (...) The problem is that most of the recycling is in China.
105 For example, a company in Australia is exporting the ore to China for the processing and
106 because there is a tariff to export it is more profitable to the whole process of manufacturing
107 there instead of reimporting the material and doing the processing in Australia and there is so
108 much competition a lot in policing their industries and the processes, but in my opinion they
109 are not very good at processing, they are very good at minimizing costs by exploiting the
110 environment and this is what I believe. (...)

111 **A:** Coming to the next topic block, also the relation between rare earths and renewable energy
112 systems again, do you think or to what extent do you think does the rare earths price have on
113 the construction of new wind energy systems for example, like, you have already done
114 research on the consumer prices but I don't think it's only the end-consumer prices but also
115 like, if the rare earth elements would be very expensive, the wind energy industry would think
116 about "do I really want to build 10 or 20 new systems", do you think that the cost of rare
117 earths effect the costs of renewable energy systems?

118 **B:** Yes. But the tunnels of these effects might be different, let's make a hypothesis here, eh,
119 the rare earths are effecting for example CO₂ emissions. How might that be the relation? Of
120 course we cannot verify it scientifically, I would say, it depends. If prices are too high then we
121 expect to see, eh, CO₂ emission persisting because industries are more reluctant to extract the
122 rare earths and build the permanent magnets, that's one thing. The second thing is that if they
123 decide to create permanent magnets without adding rare earths minerals inside, then are we
124 still having the persistence of CO₂ emissions? Or because of diversifying our portfolio so then
125 we receive a higher number of CO₂ emissions. What's happening? We don't know - this
126 depends on human choices. That's what matters. And it is up to us as researcher to find out
127 the outcome.

128 **A:** So it will be subject to the future development?

129 **B:** Because it doesn't mean we can't make predictions.

130 **A:** Yeah, what would be really interesting for me is your personal critical assessment of that
131 situation.

132 **B:** Well, but you know my answer, rare earths are affecting growth, energy consumption,
133 these are just a heads-up from my part. I think because it is a new area you will find resistance
134 from older researchers that think otherwise, “well, it’s just a mineral, I don’t see any
135 innovation here”, well, we can have this discussion 20 years now and see who is right and
136 who is not.

137 **A:** Indeed, I have received really interesting answers from researchers that are focusing one
138 side only. But in your opinion, in what direction do you think will the rare earths impact on
139 renewable energy systems evolve in the long run? There are several options: the industry
140 might find substitutes or there are different production sites somewhere else, Europe, USA,
141 Canada or there are policy restrictions.

142 **B:** In 2010 was an alarm clock that woke up Europe about that kind of issues and this why we
143 had that type of policies and we have a guiding tool explaining completely how we should
144 proceed and the answer is exploiting what there is underground in Europe. Currently, we
145 don’t have any sufficient deposits but this due to lack of research. Let me tell you, eh, in
146 Greece, couple of decades ago, we were totally ignorant of the fact that we were having oil
147 deposits. Now, eh, two Chinese companies want to become strategic partners in the industry
148 because this year a lot of deposits were found. Also Exxon Mobile have some exploration
149 rights, Repsol from Spain have some rights. All of these are the outcome of recent research on
150 a specific resource “oil”. If countries do not start to search for something in specific, then they
151 cannot have any idea of what is right below of them. So far, research on rare earths is or
152 might have been scarce, more concentrated in Scandinavia but less concentrated in the
153 Mediterranean.

154 **A:** And what do you think, because, as we can see from the guideline for example, the
155 European Union is very alarmed..

156 **B:** This is what we want we think solid here.

157 **A:** But how did they come up with that topic, what do you think? Because policy regulations
158 or restrictions might be an option as well.

159 **B:** Retaliation have a different consequences, for example, you block my rare earths supply I
160 will block your steel supply, I will regulate the market, I will put tariffs in your products and
161 this has tremendous impacts in free trade. Which I’m afraid to say could also lead to a next
162 world war which is a feasible outcome if we go wrong. Eh, history has shown many examples
163 for that. If something goes wrong, a policy can have a tremendous impact. You can also see
164 what’s happening in Venezuela for example. One policy impact. But do we have something
165 solid here? The answer is, I can say, we can find that by searching the economics of the
166 European Union, This is why I have the budget with me for the EU, the budget from 2021 to
167 2027. Currently, the budget is limited for investing in rare earths so, but I see a tremendous
168 impact after 2021, after 2021 forecasts are completely different. (... report) The budget for
169 other parts, including rare earths, is increasing enormously, this is a project for heavier
170 integration. This has passed not yet, it is only the communication. This is the ideal scenario.
171 Even France will vote for it, although they would have liked to put more money into
172 agriculture, because they are dependent on rare earths. (...)

173 **A:** Is there an industry part in Europe that told the EU, because someone had to tell them, was
174 that someone from the industry, like any industry association telling them like “we are really
175 having troubles importing rare earths elements, can you help us”?

176 **B:** No, absolutely no. When they created the budget, in specific the horizon 2020 program.
177 When we read about the horizon Europe it will help Europe to remain at the forefront of
178 global research and innovation and that’s it. They don’t want to focus on specific industries
179 but they want to cover the entire spectrum of industries that are innovative. And of course that
180 includes, eh, anything that requires rare earths in budget where they can’t be explicit about
181 that properly.

182 **A:** What be left, the direction of development within the renewable energy sector, do you
183 think recycling or substitution will also be solutions to that - do you think technology will
184 advance?

185 **B:** Currently, if you have noticed if you type “rare earths processing” or anything related in
186 Google scholar or in Scopus you will find that many of these topics are in Chinese journals.
187 So, these innovations mainly benefit the Chinese industry. Because they are in English we can
188 also benefit - also if we have access. We do not know what will happen if Chinese researchers
189 decide to write in Chinese. Eh, this might be a black scenario, currently, I do not have seen
190 that direction but you never know. And one thing about the recycling is, currently, recycling
191 of rare earths is in embryonic state, let’s be honest about that. We cannot say that recycling
192 will benefit the industry because it’s primitive it hasn’t developed much, eh, I think only
193 Hitachi at this point has a very good processing of rare earths.

194 **A:** Do you think that substitutes will play a big role in the future or will it probably be more
195 up to research?

196 **B:** No, I believe that today I think ALD has developed a new model without rare earths. For
197 me it doesn’t mean anything. For me, I see an investment on new mines, on new processes,
198 begin around the globe. Currently, we have the one in Brazil that wants to expand their mines
199 in the Amazon forest.

200 **A:** The one in the United States will reopen, is what I have heard.

201 **B:** In the United States it’s a tricky questions, in my opinion, it’s not very cost-effective to
202 extract it. Although the company that owns the mine is Chinese. Still I don’t think that the
203 Chinese are doing that on purpose. The deposits are really low there. So, my opinion is that,
204 eh, Brazil has its focus on its rare earths industry, India is to focus more on its rare earths
205 Industry, Russia as well it has deposits, Europe will search for deposits as well, of course they
206 will not be as efficient as in China but the ones in Europe have an advantage, for example, I
207 know that in Greece we have a lot of bauxite and nickel and, eh, there is a process of
208 extracting the rare earths from the bauxite and from the nickel, currently not developed, but
209 there is the opportunity there. Same can be for the other deposits in Scandinavia so we can see
210 how they can extract this kind of resource from their minerals. I mean this is where research
211 should focus on. However, always in an environmentally-friendly manner because when you
212 are doing this kind of process with extracting the rare earths it’s the same as processing
213 uranium: you have radiation. So, currently, when you go to a European radiation site you can
214 see that Sweden has not reported for a long time, I think since 15th of May, has not reported
215 anything, I suspect that their mining has exceeded the levels of radiation so they hide that
216 perhaps. And, eh, the mining processes exceed radiation, so the question is the communities

217 should be protected so invest heavily on environmentally friendly technologies, that is what I
218 think.

219 **A:** And do you think that this whole rare earths element development or opening of new sites
220 or, people around the world are interested in that or countries you could even say, is that
221 mainly because of increasing renewable energies or what industry do you think is most
222 interested in rare earths?

223 **B:** You mean most vulnerable? Well, there are many industries that are using rare earths, the
224 nuclear industry, the automotive industry, eh, anything I can imagine, the mobile phones. The
225 thing is that, in my opinion, China should be allowed to raise the prices for the rare earths
226 because by raising the prices they can invest innovation and technology that is
227 environmentally friendly. Also with the World Trade Organization, we are looking away from
228 innovation and technology. By allowing China to rise the price in that industry in mines and
229 they will have the motivation of investing in that kind of new technologies in Europe because
230 you can see profit there. If we go to the father, as organization, and say “please protect us”
231 they will not innovate and that is bad for the economy, for the European economy as well.
232 That is what I think.

233 **A:** Thank so much for sharing your knowledge!

Interview Nr. 6

Termin: 24.05.2018
Dauer: 40:00 Min. (netto)
Interviewerin A: Nomi Parnitzke
Interviewpartner B: Ingenieur (ehemals bei großem, deutschen Windkraftanlagenhersteller tätig)
Unternehmen: Ingenieurbüro/ Beratung für Windenergie
Kontakt: über Interviewpartner 4

1 **A:** Haben Sie erst einmal vielen Dank für Ihre Zeit und Bereitschaft ein Interview zu führen.
2 Könnten Sie sich kurz vorstellen und etwas zu Ihrer Person und Tätigkeit sagen?

3 **B:** Ja, ich bin seit etwa 30 Jahren in der Windenergie aktiv und seit 20 Jahren auch beruflich.
4 Ich habe in verschiedenen Firmen gearbeitet, vorher in der Firma, Vensis, die vor 10 Jahren
5 ihre Lizenz an Goldwind in China verkauft hat. Goldwind hat dann auch die Technologie und
6 Expertise mit den Permanentmagneten mitgenommen und in China zu großem Erfolg geführt.
7 Seit 10 Jahren habe ich das Ingenieurbüro (...), wo wir Generatoren für Windturbinen
8 entwerfen.

9 **A:** Woher kommen Ihre Auftraggeber - aus Europa oder auch Deutschland oder eher aus
10 anderen Ländern?

11 **B:** Also unser Hauptkunde sitzt in Indien, aber wir arbeiten auch teils für deutsche Firmen.

12 **A:** Können Sie eine Einschätzung dazu abgeben wie nachhaltig die Windenergie als solche
13 ist, auch in Bezug auf Material, Herstellung und Produktion?

14 **B:** Die Windenergie ist diejenige, die am allerschnellsten die Herstellungsenergie wieder
15 reinholt, das dauert nur 4-6 Monate, dann ist die Energiebilanz gedeckt. Und dann folgen 20
16 Jahre und mehr Stromeinspeisung. Im Vergleich zu Solaranlagen ist das deutlich besser. Das
17 größte Problem in Sachen Nachhaltigkeit sind die tausenden Tonnen Verbundwerkstoff aus
18 den Blättern, die sind kaum recycelbar. Man kann die schreddern und unter Beton mischen
19 zum Beispiel, die ersten Anlagen kommen ja jetzt an die Altersgrenze. Stahl ist dagegen
20 perfekt recycelbar. So ein Rückbau von einer Windkraftanlage ist schnell gemacht - abbauen,
21 das Fundament ausgraben und dann ist es fertig.

22 **A:** Jetzt schon mal zu dem Thema seltene Erden - wie präsent ist dieses Thema in Ihrem
23 Tätigkeitsbereich eigentlich, also liest man darüber in der Fachliteratur oder tauscht sich mit
24 Geschäftspartnern und Kollegen darüber aus?

25 **B:** Ja klar, aber ich würde sagen eher zyklisch. Als 2011 die Preise von China so erhöht
26 wurden, war das natürlich Thema, vor 2010 noch nicht so. Aber der Preis-Peak 2011 hat viele
27 Leute sehr verunsichert, die haben sich dann von der Technik abgewendet.

28 **A:** Und welchen Einfluss haben die Preise seltener Erden auf die Herstellung von
29 Windkraftanlagen?

30 **B:** Da kann ich mal ein konkretes Beispiel geben, also der Drehmoment bei einer
31 getriebelosen Anlage für 3.000 KW Leistung, da braucht man bei getriebeloser Anlage 2.000-
32 3.000 kg Magnete. Bei 30-40 € pro Kilogramm ist das natürlich enorm, wenn sich der Preis
33 verdrei- oder vierfacht. Das braucht man dann nur für Anlagen ohne Getriebe, bei der

34 Technologie der mittelschnellen Anlagen wie Vestas die zum Beispiel baut, die 8MB zum
35 Beispiel, braucht man deutlich weniger Magneten, vielleicht 1.000 kg, da ist dann auch die
36 Abhängigkeit deutlich geringer.

37 Es gibt da eine Studie aus 2010, die sagt, dass die Windenergie nicht mal 5 Prozent des
38 globalen Neodymverbrauchs beansprucht. Früher wurde das noch in Festplatten verbaut, aber
39 heute ist der Trend zu sehen, dass immer mehr Festplatten durch andere Speicher, diese SSD
40 Feststoffspeicher, ersetzt werden, da braucht man heute auch kein Neodym mehr. Die Frage
41 wäre, ob es hier schon neue Zahlen oder Statistiken zu gibt. Ein anderer großer Trend ist jetzt
42 die Elektromobilität, die brauchen sehr effiziente und kompakte Permanentmagneten und die
43 werden jetzt schon aber in der Zukunft erst Recht über dem Bedarf der Windenergie liegen.
44 Also wenn man sich fragt wie Wind den Weltmarktpreis der seltenen Erden beeinflusst: eher
45 am wenigsten.

46 **A:** Wissen Sie, wo die Magnete, die Sie zum Beispiel einplanen oder die hier in Europa
47 verwendet werden, herkommen beziehungsweise, wo sie produziert werden? Hauptsächlich in
48 China oder auch wo anders?

49 **B:** Ja, aus China hauptsächlich, aber auch aus Europa und Deutschland. Hier werden vor
50 allem die sehr hochpreisigen Magnete hergestellt. Es gibt zum Beispiel das Unternehmen
51 WAC, früher Vakuumschmelze. Die Standardmagnete kommen dann aus China.

52 **A:** Und wie sieht die Beschaffungssituation hier aus - ist es problemlos an die seltenen Erden
53 heranzukommen oder gibt es auch Schwierigkeiten?

54 **B:** Ja, ja, das ist eine reibungslose Zusammenarbeit mit den Zulieferern. Es gibt jetzt zum
55 Beispiel eine Messe in Berlin, da kommen viele, viele Anbieter aus China und stellen ihre
56 Produkte, also Magnete, vor - die sind sehr gut vertreten. Die Anbieter aus China haben auch
57 zu den großen Unternehmen wie Siemens und Bosch gute Beziehungen.

58 **A:** Nochmal zum Zusammenhang von seltenen Erden und Windkraftanlagen: in welcher
59 Weise beeinflussen die Kosten von Neodym beispielsweise die Kosten von Planung,
60 Herstellung und Betrieb von Windkraftanlagen? Gibt es auch Vor- oder Nachteile bei der
61 Verwendung oder Nichtverwendung seltener Erden?

62 **B:** Einen Riesenvorteil! Seltene Erden sind in der Verwendung ungemein attraktiv, denn sie
63 machen den Generator sehr effizient. Technisch gesehen ist die Windenergie schwankend,
64 läuft also oft auch im Teillastbereich. Permanentmagneten spielen wichtige eine Rolle, denn
65 die Leistung ist mit Permanentmagneten um 3-5 Prozent höher als ohne. Im Betrieb ist es
66 auch ein Vorteil, da die Effizienz höher ist. Auch Vestas zum Beispiel würde das sonst nicht
67 machen. Besonders offshore ist die Effizienz um zwei bis drei mal höher, vor dem
68 Hintergrund ergibt sich ein Riesenvorteil durch den Einsatz von Permanentmagneten.
69 Außerdem hat man offshore einen geringeren Wartungsaufwand, die Anlagen sind nämlich 20
70 bis 30 Jahre wartungsfrei. Ohne Permanentmagneten läuft der Strom über Schleifringe und
71 die sind sehr verschleißbehaftet.

72 **A:** Wissen Sie, ob in der Windbranche etwas über Substitute bekannt ist bzw. werden diese
73 als Ersatz seltener Erden in Betracht gezogen?

74 **B:** Ja, gerade nach 2011 wurde nach Alternativen gesucht - in allen Bereichen, nicht nur in
75 der Windbranche, sondern überall, wo Maschinen mit Magnet laufen. Man hat dann einige
76 Magnete durch Ferritmagnete ersetzt, aber die haben nur ein Zehntel der Magnetdichte eines
77 Permanentmagneten. Dafür kann man gegenüber Neodym Kosten sparen. Aber seither sind

78 die Preise wieder auf normalem Niveau. Es gibt einigermaßen guten Ersatz in Samarium und
79 Kobalt, die Stoffe sind von den Eigenschaften her ähnlich, aber derzeit auch doppelt so teuer.
80 Das ist eben Alternativmaterial, das gibt es schon länger als Neodym. Die Enercon hat auch
81 Alternativen ganz ohne seltene Erden oder man geht wieder zurück auf stromerregte
82 Generatoren.

83 **A:** Ich habe schon gehört, dass Windkraftanlagen in etwa 20 bis 30 Jahre laufen können, aber
84 wissen Sie konkret etwas über die Lebensdauer von Permanentmagneten?

85 **B:** Die Magnetisierung der Magneten geht zurück, aber exponentiell, also 1 Prozent im ersten
86 Jahr, wieder ein Prozent in zehn Jahren und ein Prozent in 100 Jahren. Bei einer Lebensdauer
87 von 30 Jahren ist das kein Problem. Man braucht natürlich Korrosionsschutz für die
88 Magneten, denn die sind deutlich korrosiver als Stahl zum Beispiel. Wenn man das im Griff
89 hat, gibt es kein großes Problem mit Permanentmagneten. Mittlerweile gibt es
90 Betriebserfahrung und die ersten Anlagen sind 20 Jahre alt.

91 **A:** Wissen Sie, woher die seltenen Erden kommen, die für die von Ihnen entworfenen
92 Anlagen verwendet werden?

93 **B:** Fast ausschließlich aus China. Es gibt immer wieder anderweitige Bemühungen in
94 Australien, Indonesien und Kanada, aber sonst gibt es keine großen Lagerstätten. Im
95 Vergleich zu den chinesischen Preisen lohnt es sich derzeit auch einfach nicht für andere
96 Länder, seltene Erden abzubauen. Das ist eine starke chinesische Dominanz.

97 **A:** Was wissen Sie über die Entsorgung oder das Recycling von seltenen Erden, kann man die
98 im Anschluss wiederverwenden?

99 **B:** Neodym ist sehr gut recycelbar und das wird auch gemacht. Erst wird es entmagnetisiert,
100 dann kann man es zermahlen und pulverisieren und danach neu aufbauen und neu
101 magnetisieren.

102 **A:** Wenn man den Einfluss der seltenen Erden auf die Kosten von Windkraftanlagen
103 betrachtet: wo sehen Sie die größten Chancen oder Schwierigkeiten, in der Beschaffung, der
104 Wiederaufbereitung oder der Entsorgung?

105 **B:** Ich könnte mir eigentlich schon vorstellen, dass es eher stabil bleibt. Man weiß aber nicht
106 wie sich die Preise entwickeln, auch bei einer Preisverdopplung wäre Neodym noch attraktiv.
107 Bei einer Preisverdopplung werden auch andere Länder abbauen. Aber vor allem die E-
108 Mobilität wird sehr viel an seltenen Erden brauchen. Als Windenergieentwickler würde ich
109 mir eher keine Gedanken machen. Aber dieses Thema wird oft mit unsicheren Kunden
110 diskutiert. Bei Siemens zum Beispiel ist es so, dass die ja den Direct Drive mit
111 Permanentmagneten haben. Die haben ihre eigene Fabrik in Indonesien geplant, aber ich weiß
112 nicht, ob schon in Betrieb. Die brauchen natürlich Magneten nicht nur für Windkraftanlagen,
113 sondern für viele andere Antriebstechniken. Die wollen ihre eigene Ressource, um sicher
114 agieren zu können. Solche Aktionen oder Initiativen wird es in Zukunft mehr geben, aber es
115 kein so grundsätzliches Thema. Ich meine, ja, bei China kann man schon ein schlechtes
116 Gewissen haben und das habe ich auch, denn das, was die machen ist alles andere als
117 nachhaltig. Das ist auf jeden Fall eine dunkle Seite der erneuerbaren Energien.

118 **A:** Wenn Sie die Zukunft betrachten, in welche Richtung denken Sie wird sich der Einfluss
119 seltener Erden auf die Windenergie entwickeln? Zur Auswahl gäbe es Substitute, andere
120 Produktionsstätten, politische Restriktionen oder Maßnahmen und Recycling.

121 **B:** Langfristig werden die Preise dann doch steigen. Dann werden andere Länder mit ins Spiel
122 kommen und es wird eine bessere Kontrolle über die seltenen Erden geben. Gerade in
123 Australien und Kanada würde es viel transparentere Bedingungen für den Abbau geben. Aber
124 der Bedarf steigt dramatisch an: da wird China allein gar nicht hinterherkommen. Recycling
125 macht eh jeder: das ist natürlich sehr wertvoll. Es werden schließlich Tonnen an Stein bewegt,
126 um Neodym zu gewinnen. Wenn es einmal verbaut wurde, muss man es nur wieder
127 rausnehmen und hat es direkt in Reinform vorliegen. Gerade auch für Handy und iPads wird
128 das Recycling wichtiger werden. Dysprosium ist noch 10 bis 20 mal teurer als Neodym, aber
129 je mehr Dysprosium man anteilmäßig hat, desto höher kann man in der Temperatur gehen.
130 Das braucht man für High Performance Motoren in der E-Mobilität. Die werden brauchen die
131 teureren Magnete. Im Wind nimmt man die billigsten Magnete, um Kosten zu sparen.
132 Deswegen versucht man im Wind auch Dysprosium freie Magnete zu verwenden oder
133 möglichst wenig davon - da ist man auf low cost aus.

Interview Nr. 7

Termin: 22.06.2018 in Wien (Firmenzentrale Österreich)
Dauer: 60 Min.
Interviewerin A: Nomi Parnitzke
Interviewpartner B: Geschäftsführer
Unternehmen: Windsparte eines internationalen Technologiekonzerns
Kontakt: über Hannover Messe

1 **A:** Haben Sie vielen Dank für den kurzfristigen Termin und Ihre Bereitschaft zu einem
2 Interview. Können Sie kurz erklären, in welchem Bereich Sie tätig sind und was Ihre
3 Aufgaben im Unternehmen sind?

4 **B:** Ja, gerne. Ich bin für den Service in den Regionen Zentral- und Osteuropa zuständig und in
5 Österreich eben Geschäftsführer. Ich mache die Organisation der Wartung von
6 Windkraftanlagen und auch die Betreuung während der gesamten Lebensdauer.

7 **A:** Die Windkraft gehört ja zu den erneuerbaren Energien und diese sind eher nachhaltig
8 geprägt - für wie nachhaltig halten Sie Windkraftanlagen allgemein und auch im
9 Zusammenhang mit Material, Herstellung und Produktion?

10 **B:** Das betrifft hauptsächlich die Ressourcen und den gesamten Produktionszyklus der
11 Anlagen: was geht rein und was geht raus. Bestimmt gibt es auch hier Verbesserungsbedarf
12 wie in allen anderen Industriebereichen. Es gibt ja zum Beispiel dieses Fair Phone, wo sie
13 ganz nachhaltig sein wollen und ganz sauber produzieren, aber auch das schaffen die nicht zu
14 100 Prozent und das Fair Phone ist nicht ganz grün. Und es ist dann in allen Branchen so,
15 dass man nicht alles erneuerbar bekommen kann und natürlich Kosten sparen will, wo es geht.

16 **A:** Nun würde ich gern zu dem Thema seltene Erden kommen. Wie ist das bei Ihnen
17 grundsätzlich - spricht man darüber mit Kollegen oder haben Sie persönlich schon etwas dazu
18 gelesen oder auf Tagungen gehört?

19 **B:** Als ich anfang, äh, vor etwa zehn Jahren, war das schon ein großes Thema. Da wurden die
20 Direct Drive Turbinen eingeführt und es gab viele Diskussionen. Die Vorteile haben aber klar
21 überwogen. Dann ging es darum, wo man die seltenen Erden herbekommen kann und
22 gleichzeitig den Impact relativ gering halten. Der Hauptvorteil von Permanentmagneten ist ja
23 das Gewicht. Ansonsten wird Kupfer verbaut und das ist sehr schwer. (Unser Unternehmen)
24 hat beide Versionen im Portfolio - das liegt an der Fusion mit dem spanischen Unternehmen.
25 Ganz neu in der Entwicklung gibt es jetzt eine neue Anlage, die wieder ohne Direct Drive ist
26 und weniger seltene Erden braucht, aber generell geht die Ausrichtung - vor allem offshore -
27 zu den Direct Drive Anlagen. Bei denen ist der große Vorteil, dass die weniger drehende
28 Teile haben - also der Vorteil ist die Verfügbarkeit. Dann ist die Frage: wie erreiche ich die
29 Maschinen? Ähm, offshore ist das natürlich schwierig mit Wind und Wasser, da ist die
30 Wartung eine richtige Herausforderung. Beide Modelle haben ihre Vorteile.

31 **A:** Haben Sie Einblicke über die Verwendung seltener Erden im Unternehmen, wissen Sie,
32 wie die Beschaffung dieser Materialien abläuft?

33 **B:** Nein, wie gesagt: da hab ich wenig Einblick. Damals hatte ich Einblick bei meiner ersten
34 Anlage ganz am Anfang. Ich weiß nur, dass wir natürlich sehr große Abnahmen hatten und
35 das ein Vorteil war am Markt. Aber im Einkauf ging es dann hauptsächlich darum, die Preise
36 einfach stabil zu halten.

37 **A:** Ich nehme an, dass man bei Eintritt in die Windenergiebranche davon erfährt, gerade,
38 wenn man von der technischen Seite kommt, aber seit wann genau ist Ihnen der
39 Zusammenhang zwischen Windkraftanlagen und seltenen Erden ein Begriff?

40 **B:** Der Begriff „selten“ ist sowieso fehlleitend, die Metalle sind ja gar nicht selten. Ich habe
41 sogar mal was gehört davon, dass die seltene Erden in der DDR verbaut haben in
42 Häuserleitungen und so was. Und dann haben die Leute als die seltenen Erden so teuer
43 wurden die Rohre und so abgebaut, aber ich weiß es nicht mehr so genau.

44 **A:** Wahrscheinlich ist das jetzt nicht mehr der Fall in Ihrer Position, aber vielleicht hatten Sie
45 damals Einblick in die Verwendung seltener Erden in Windkraftanlagen? Wissen inwiefern
46 die seltenen Erden für die Kosten von den Anlagen berücksichtigt werden?

47 **B:** Hier bei uns werden die Magnete von Zulieferern angeliefert, ähm, das läuft ab wie jeder
48 andere Einkaufsprozess. Wir haben unsere Business Conduct Guidelines, also dass man auf
49 Kinderarbeit verzichtet und andere Sachen, aber sonst gibt es - meines Wissens nach - genau
50 die gleichen Strategien wie in jedem Einkauf.

51 **A:** Wie ist die Portfoliogewichtung in Ihrem Unternehmen - also von welchen Anlagen
52 werden die meisten hergestellt?

53 **B:** Da schauen Sie wohl am besten in den Jahresbericht - da kann ich Ihnen jetzt im Detail
54 keine Zahlen zu sagen. Gerade offshore setzen wir mehrheitlich auf Direct Drive, ja, auf jeden
55 Fall. Onshore, mal sehen, da kenne ich die genaue Entwicklung nicht.

56 **A:** Wie ist das mit der Lebensdauer von Windkraftanlagen? Geben Sie als Hersteller eine
57 genaue Lebensdauer an oder gibt es noch keine richtigen Zahlen dazu, weil die Branche noch
58 so jung ist?

59 **B:** Es gibt mal die Designlifetime, die beträgt 20 bis 25 Jahre. Es ist immer die Frage, worauf
60 man die Anlagen auslegen soll - also was wollen die Kunden? Alte Anlagen werden teilweise
61 auch früher erneuert und dann gibt es gar keine vollständige Lebensdauer wie sie angegeben
62 war. Aber ich muss sagen: das ist ein Business wie jedes andere - das ist gar nicht so grün,
63 wie man immer denkt. Größere Anlagen brauchen größere Ausbauten - das Wachstum ist
64 enorm: beim Rotor gibt es einen exponentiellen Anstieg in der Größe. Einige Standorte sind
65 mit kleineren Anlagen besetzt, die dann eben durch größere, effizientere ersetzt werden. Es
66 gibt auch einen second-hand Markt für Turbinen.

67 **A:** In Bezug auf seltene Erden, aber auch auf die gesamte Windkraftanlage: wissen Sie etwas
68 über die Wiederverwertung bzw. das Recycling?

69 **B:** (lacht) Das ist witzig, weil darüber hab ich meine Masterarbeit geschrieben! Über die
70 Verwertung und Repowering. Aber bisher gibt es noch nicht so viel dazu. Offshore wurde
71 bisher nur ein einziger Windpark dekonstruiert. Und man muss ja das Gebiet so hinterlassen
72 wie es vorher war. Bei dem Reinrammen vom Fundament hat man schon einen ziemlichen
73 Eingriff in die Natur, da gibt es auch viel Kritik auf dieser Seite. Ähm, aber witziger Weise
74 haben, wie heißt das nochmal auf deutsch, marine life, also die Fische und so unter Wasser,
75 sich viel mehr an den Fundamenten von Windkraftanlagen angesiedelt. Da dürfen ja keine
76 Schiffe fahren also wird da nicht gefischt und das merken die natürlich und fühlen sich sicher.
77 Bei der Dekonstruktion reißt man dann den Erdboden auf und vernichtet das alles - da ist eben
78 auch die Frage, ob der alte Zustand wiederhergestellt wird oder wie sinnvoll das ist.

79 **A:** Bezüglich des Rückbaus von Windkraftanlagen - wissen Sie etwas darüber, ob die Preise
80 für den Rückbau oder das Recycling einkalkuliert werden?

81 **B:** Kommt immer drauf an, was das für Anlagen sind. Mit einem Stahlturm hat man schon
82 mal kein Problem. Stahl wird einfach wiederverwendet, eingeschmolzen usw. Wenn die
83 Türme aus anderem Material sind ist es eher ein Problem - genau wie bei den Blättern aus
84 Harzen und Verbundwerkstoffen. Das ist ja im Prinzip glasfaserverstärkter Kunststoff. Es soll
85 natürlich auch so billig wie möglich demontiert werden. Die Blätter kann man zerkleinern und
86 in Zement oder so geben, aber dann ist auch die Frage: wie viel Zement braucht man
87 eigentlich? Also so viel dann auch wieder nicht. Und verbrennen kann man die Stoffe
88 theoretisch auch, aber man braucht riesige Zerkleinerungsmaschinen und da gibt es kaum
89 welche von. Und da Material manuell zu zerkleinern ist viel zu viel Aufwand. Ich seh das
90 aber so: wenn es ein Problem gibt, gibt es auch eine Lösung. Die Industrie wird sich schon
91 anpassen und eine gewisse Professionalität entwickeln - da werden schon noch Konzepte
92 kommen für die Verwertung. Aber die Erprobung gibt es dann eben erst, wenn es immer mehr
93 Demontagen gibt.

94 **A:** Wissen Sie woher die seltenen Erden stammen, die in Generatoren in Ihrem Unternehmen
95 verbaut werden?

96 **B:** Nicht sicher. Also bevor ich da jetzt was Falsches sage.. Ich meine, dass es zumindest
97 früher Australien war, aber ich weiß es nicht. Ist dann auch die Frage wie lang diese Verträge
98 waren - das kann auch schon längst anders sein.

99 **A:** Zwar wurde das jetzt schon deutlich, dass die seltenen Erden keinen so großen Einfluss auf
100 die Windkraftanlagen in Ihrem Unternehmen haben oder Sie keine direkten Einblicke haben,
101 aber wie sehen Sie den Einfluss seltener Erden auf Windkraftanlagen grundsätzlich? Denken
102 Sie, es wird z.B. Substitute geben oder wird man die einfach weiterhin nutzen wie bisher?

103 **B:** Also wie gesagt - damals bei der Einführung der Anlage hatte ich Einblicke - ich wusste
104 viel mehr aber jetzt kann ich nicht mehr viel dazu sagen. Ich finde, heute haben mehr Leute
105 was gegen Windkraft als gegen seltene Erden z.B. Ich habe keinen Kontakt mehr dazu. Ich
106 habe auch keine Ahnung von Substituten - die müssten dann ja die gleichen Eigenschaften
107 haben wie die Permanentmagnete, dann könnte man die natürlich nutzen. Das Gewicht ist der
108 größte Vorteil - wenn ein anderer Magnet das gleiche leisten kann, wären Substitute denkbar,
109 ansonsten sind seltene Erden wichtig. Wie gesagt, ich glaube ja die Wirtschaft löst ein
110 Problem, wenn es eben da ist. Die Industrie wird drauf reagieren - auch bei Ressourcen. Was
111 überlebt am Ende? Auch gute Ideen scheitern. Es gibt immer viel Veränderung und die
112 Industrie reagiert drauf. Die Kernfusion, an der forschen sie in Frankreich, soll 2055 oder so
113 auf den Markt kommen. Dann brauchen wir keine erneuerbaren Energien mehr, weil das
114 Problem gelöst ist. Ich sehe diese Energieformen eher als Zwischenlösung, aber sicher nicht
115 als endgültige Lösung.