



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Sekundäre Ströme kritischer Rohstoffe in Österreich - mit Fokus auf Erneuerbare Energien

verfasst von

Jakob VÖLKER, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Umwelt- und Bioressourcenmanagement

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, November 2021

Betreut von:

Univ.Prof. Dipl.-Phys. Dr.phil.nat. Liebert Wolfgang
Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich diese Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Gedanken, die im Wortlaut oder in grundlegenden Inhalten aus unveröffentlichten Texten oder aus veröffentlichter Literatur übernommen wurden, sind ordnungsgemäß gekennzeichnet, zitiert und mit genauer Quellenangabe versehen.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder ganz noch teilweise in gleicher oder ähnlicher Form an einer Bildungseinrichtung als Voraussetzung für den Erwerb eines akademischen Grades eingereicht. Sie entspricht vollumfänglich den Leitlinien der Wissenschaftlichen Integrität und den Richtlinien der Guten Wissenschaftlichen Praxis.

Wien, 09.11.2021

Jakob VÖLKER (eigenhändig)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Allen voran möchte ich meinen Eltern, Manfred und Elisabeth Völker, von ganzem Herzen danken. Sie haben mich in all meinen Entscheidungen unterstützt und mir das Studium so einfach wie möglich gemacht. Außerdem danke ich meinen Brüdern, Vinzenz und August Völker, sowie meiner Freundin, Viktoria Szenkurök, für die Unterstützung.

Ein großer Dank geht auch an meinen Diplomarbeitsbetreuer Herrn a.o. Univ.Prof. Dipl.-Phys. Dr.phil.nat. Wolfgang Liebert als auch an Mag. Dr. Markus Drapalik sowie an das gesamte Team des Institutes für Sicherheits- und Risikowissenschaften für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	i
Danksagung	ii
Inhaltsverzeichnis.....	iii
Kurzfassung.....	vi
Abstract	vii
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung, Zielsetzung und Forschungsfrage.....	2
1.2 Forschungsmethodik.....	3
2. Kritische Rohstoffe in erneuerbaren Energietechnologien	6
2.1 Das Konzept der Kritikalität.....	6
2.2 Metaanalyse kritischer Rohstoffe	7
2.3 Vorauswahl der betrachteten Technologien	10
2.4 Detailanalyse der erneuerbaren Energietechnologien Österreichs	12
2.4.1 Solarthermie	12
2.4.2 Photovoltaik	20
2.4.3 Windkraft	28
2.5 Kumulierter Bedarf an kritischen Rostoffen für den zukünftigen Ausbau erneuerbarer Energien in Österreich bis 2040	36
2.5.1 Entwicklung der Solarthermie und kumulierter Bedarf an kritischen Rohstoffen... 36	
2.5.3 Entwicklung der Windkraft und kumulierter Bedarf an kritischen Rohstoffen.....	38
2.5.4 Zusammenfassung.....	40
3. Detailanalyse der identifizierten kritischen Metalle.....	42
3.1 Die Geologie und Technologie der Metalle	42
3.2 Aluminium.....	45
3.2.1 Vorkommen	46
3.2.2 Versorgungssituation für Österreich	46
3.3 Kupfer.....	47
3.3.1 Vorkommen	48
3.3.2 Versorgungssituation für Österreich	49
3.4 Eisen	49
3.4.1 Vorkommen	49
3.4.2 Versorgungssituation für Österreich	50
3.5 Silizium.....	50

3.5.1 Vorkommen	51
3.5.2 Versorgungssituation für Österreich	51
3.6 Zinn.....	52
3.6.1 Vorkommen	52
3.6.2 Versorgungssituation für Österreich	53
3.7 Silber.....	53
3.7.1 Vorkommen	54
3.7.2 Versorgungssituation für Österreich	55
3.8 Blei.....	55
3.8.1 Vorkommen	55
3.8.2 Versorgungssituation für Österreich	56
3.9 Zink.....	56
3.9.2 Versorgungssituation für Österreich	57
3.10 Gold	58
3.10.1 Vorkommen	58
3.10.2 Versorgungssituation für Österreich	59
3.11 Molybdän.....	59
3.11.1 Vorkommen	60
3.11.2 Versorgungssituation für Österreich	61
3.12 Palladium	61
3.12.2 Versorgungssituation für Österreich	63
3.13 Chrom	63
3.13.1 Vorkommen	63
3.13.2 Versorgungssituation für Österreich	64
3.14. Mangan	64
3.14.1 Vorkommen	65
3.14.2 Versorgungssituation für Österreich	66
3.15 Zusammenfassung	66
4. Handlungsmöglichkeiten für metallische Rohstoffe	68
4.1 Expertise und Wissenstransfer.....	68
4.1.1 Offenlegungspflicht für geologische Daten	69
4.1.2 Internationale Zusammenarbeit	69
4.2 Versorgungssicherheit	70
4.2.1 Recycling	70
4.2.2 Diversifizierte Bezugsquellen	73

4.2.3 Lagerhaltung	75
4.3 Ressourceneffizienz.....	76
4.3.1 Gewinnung von Rohstoffen	77
4.3.2 Industrie und Endverbraucher	78
4.4 Internationale Rohstoffpolitik.....	80
5. Ergebnisse	84
6. Schlussfolgerung	88
7. Literaturverzeichnis.....	90
8. Tabellenverzeichnis.....	98
9. Abbildungsverzeichnis	99

Kurzfassung

Laut dem aktuellen Regierungsprogramm (2020-2024) soll Österreich bis zum Jahr 2040 ein klimaneutrales Land werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden große Anstrengungen im Ausbau erneuerbarer Energietechnologien nötig. Kritische Rohstoffe sind wesentlicher Bestandteil erneuerbarer Energieanlagen. Es ist bekannt, welche Rohstoffe in diesen Technologien vorhanden sind, jedoch herrscht derzeit kein wissenschaftlicher Konsens über die Kritikalität der Elemente. Ziel dieser Arbeit ist es, die Menge an kritischen Rohstoffen in den erneuerbaren Energieanlagen Österreichs zu messen und Handlungsoptionen für eine sichere Versorgung Österreichs mit kritischen Rohstoffen zu erarbeiten. Zusätzlich zu einer Metaanalyse zehn internationaler Studien zur Kritikalität von Elementen wird im Rahmen eines univariaten Prognoseverfahrens, der exponentiellen Glättung, der Ausbau der erneuerbaren Energietechnologien in Österreich auf Basis historischer Werte bis zum Jahr 2040 prognostiziert. Mit Hilfe dieser wird die künftige Menge an kritischen Rohstoffen errechnet. Es zeigt sich, dass Photovoltaik-, Windkraft- und Solarthermieranlagen insgesamt 13 kritische Metalle enthalten. Obwohl zur Bedarfsdeckung aus geologischer Sicht ausreichend Metalle vorhanden sind, sorgt die hohe Importabhängigkeit Österreichs dafür, dass der Zugang zu diesen Metallen zu bezahlbaren Preisen nicht garantiert werden kann. Um eben diesen Zugang auch in Zukunft zu gewährleisten, braucht es gezielte Maßnahmen im Bereich der Expertise und des Wissenstransfers, der Versorgungssicherheit, der Ressourceneffizienz und der internationalen Rohstoffpolitik. Diese müssen sowohl von Seiten der Politik als auch Industrie unterstützt werden.

Schlagwörter: Kritische Rohstoffe, erneuerbare Energietechnologien, Metalle, Handlungsoptionen

Abstract

According to the current government program (2020-2024), Austria is to become a climate-neutral country by 2040. In order to achieve this goal, major efforts will be required in the expansion of renewable energy technologies. Critical raw materials are essential components of renewable energy plants. It is known which raw materials are present in these technologies, but currently there is no scientific consensus on the criticality of the elements. The aim of this work is to measure the amount of critical raw materials in Austria's renewable energy plants and to develop options for action to secure Austria's supply of critical raw materials. In addition to a meta-analysis of ten international studies on the criticality of elements, a univariate forecasting method, exponential smoothing, is used to forecast the expansion of renewable energy technologies in Austria up to the year 2040 based on historical values. With the help of these, the future amount of critical raw materials is calculated. It is shown that photovoltaic, wind power and solar thermal systems contain a total of 13 critical metals. Although sufficient metals are available to cover demand from a geological point of view, Austria's high dependence on imports ensures that access to these metals at affordable prices cannot be guaranteed. To guarantee this access in the future, targeted measures are needed in the areas of expertise and knowledge transfer, security of supply, resource efficiency and international raw materials policy. These must be supported by both politics and industry.

Keywords: Critical raw materials, Renewable energy technologies, Metals, Options for action

1. Einleitung

Mit dem Pariser Klimaabkommen aus dem Jahr 2015 verpflichteten sich 195 Länder durch ein völkerrechtlich verbindliches Abkommen die Erwärmung des Planeten Erde im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf unter 2 °C zu beschränken (Müller, 2018, S. 4). Auch Österreich bekennt sich zu den Zielen des Pariser Klimaabkommens. So will Österreich bis spätestens 2040 ein klimaneutrales Land werden. Dabei will Österreich zur Gänze auf Atomkraft verzichten und ausschließlich auf erneuerbare Energieträger setzen (Österreichische Bundesregierung, 2020, S. 102).

Im europäischen Vergleich nimmt Österreich neben Schweden, Finnland, Lettland und Dänemark eine der führenden Rollen bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen ein (Eurostat, 2020). Mehr als 70% des erzeugten Stroms werden bereits aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen. Aufgrund der topografischen Lage Österreichs werden dabei insbesondere zwei Ressourcen in hohem Ausmaß zur Gewinnung der Energie genutzt: Wasserkraft und Biomasse. Doch auch die Verwendung von Windkraft, Photovoltaik und anderer erneuerbarer Energietechnologien stieg über die letzten Jahre kontinuierlich an (BMK, 2020, S. 17–18). Im Jahr 2019 wurden in Österreich 516,2 PJ an inländischer Primärenergie erzeugt. Dabei tragen die erneuerbaren Energien mit einem sehr hohen Anteil von über 83% zur inländischen Primärenergieerzeugung bei (siehe Abbildung 1).

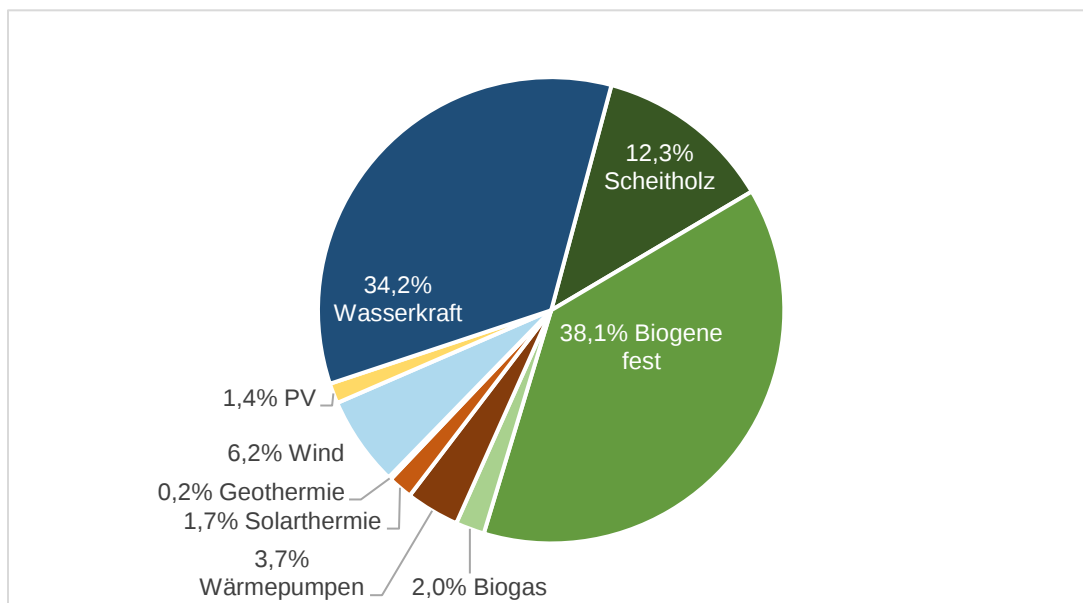


Abbildung 1: Erzeugungsstruktur der erneuerbaren Energien in Österreich im Jahr 2019 (Eigene Darstellung) (BMK, 2020, S. 18)

Aufgrund der zunehmenden Relevanz der erneuerbaren Energietechnologien muss auf deren Nachhaltigkeitskriterien geachtet werden. Zu diesen zählen neben den Auswirkungen auf das Klima und die Ökosysteme sowohl die Versorgungssicherheit als auch der Ressourcenbedarf (Müller, 2018, S. 4). Erneuerbare Energietechnologien enthalten eine Vielzahl von Materialien, allen voran Metalle. Metalle nehmen bei der Umgestaltung des Energiesystems eine wichtige Rolle ein (acatech et al., 2017, S. 13). Aufgrund dessen wird die Nachfrage nach diesen Materialien weiter steigen (Blengini et al., 2020, S. 1). So prognostiziert die OECD (2019, S. 3), dass sich der globale Materialbedarf von 79 Milliarden (Mrd.) t im Jahr

2011 auf 167 Mrd. t im Jahr 2060 mehr als verdoppeln wird. Diese Prognosen deuten darauf hin, dass bestimmte Metalle in Zukunft knapp und somit die Verfügbarkeit dieser Stoffe kritisch werden könnte.

Österreich ist in den letzten Jahrzehnten zunehmend von Rohstoffimporten abhängig geworden. Bereits 1975 wird von der Europäischen Kommission (KOM) betont, dass 70 bis 100% der metallischen Rohstoffe von außerhalb Europas importiert werden (Tiess, 2009, S. 91). Im Jahr 2008 wird von der KOM festgehalten, dass die Zugriffsmöglichkeiten der Europäischen Union (EU) bezüglich strategisch wichtiger Rohstoffe stark beeinträchtigt wurden und die Rohstoffpreise enorm angestiegen sind (KOM, 2008, S. 5). Die hohe Importabhängigkeit der EU kann in einigen Bereichen durch bestimmte Maßnahmen reduziert werden. Jedoch kann es in einigen Sektoren zu keiner Eigenversorgung kommen, da in Europa entweder die entsprechenden Lagerstätten fehlen oder im gegenwärtigen Ausmaß nicht vorhanden sind. Daher wird die EU als auch Österreich auch in Zukunft auf Rohstoffimporte angewiesen sein (Tiess, 2009, S. 94)

Aufgrund der bevorstehenden Energiewende und der damit einhergehenden weltweiten Nachfrage nach metallischen Rohstoffen befasst sich diese Masterarbeit in einem ersten Teil mit den kritischen Metallen in den erneuerbaren Energieanlagen Österreichs und in einem zweiten Teil mit den Handlungsmöglichkeiten Österreichs, um auch in Zukunft eine Versorgung mit metallischen Rohstoffen zu gewährleisten.

1.1 Problemstellung, Zielsetzung und Forschungsfrage

Problemstellung

Viele wissenschaftliche Arbeiten haben sich bisher mit der Kritikalität von einzelnen Elementen beschäftigt (Graedel et al., 2015; Hatayama & Tahara, 2015; Nassar et al., 2016; Schulz et al., 2017). Ebenso wurden bereits Studien über den Rohstoffbedarf erneuerbarer Energietechnologien in Ländern wie etwa Deutschland (Viebahn et al., 2014) durchgeführt. Für Österreich fehlen bisher genauere Studien über den Rohstoffbedarf der am Markt befindlichen erneuerbaren Energietechnologien. Zwar gibt es wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit dem Rohstoffbedarf in den österreichischen Photovoltaik- und Windkraftanlagen beschäftigen (Luidold et al., 2011; Scherhauser et al., 2020), jedoch wurden andere erneuerbare Energietechnologien außer Acht gelassen. Über dies hinaus gibt es nur wenige Handlungsempfehlungen zum Umgang mit kritischen Rohstoffen in Österreich.

Ziel der Arbeit

Abgeleitet von der oben angeführten Problemstellung soll in dieser Masterarbeit in einem ersten Teil der Anteil der kritischen Rohstoffe in den erneuerbaren Energietechnologien Österreichs analysiert werden. In einem zweiten Teil werden die Handlungsmöglichkeiten für Österreich dargelegt, um so den Umgang mit kritischen Rohstoffen in Zukunft nachhaltiger zu gestalten.

Forschungsfrage

Die Forschungsfrage dieser Masterarbeit ist:

„Welche kritischen Rohstoffe liegen in welchen Mengen in den erneuerbaren Energietechnologien Österreichs vor und welche Handlungsmöglichkeiten bestehen, um auch in Zukunft eine Versorgung mit kritischen Rohstoffen zu gewährleisten?“

1.2 Forschungsmethodik

Zur Beantwortung eben genannter Forschungsfrage, bedient sich die vorliegende Arbeit theoretischer sowie quantitativer Methoden. Dabei bildet eine Analyse bereits bestehender Forschung die Grundlage und wird mit einer eigenen quantitativen Analyse zum zukünftigen Ausbau der erneuerbaren Energietechnologien in Österreich bis zum Jahr 2040 ergänzt.

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeitsschritte anhand der folgenden drei Hauptkapitel erläutert: Kapitel 2 - Kritische Rohstoffe in erneuerbaren Energietechnologien, Kapitel 3 - Detailanalyse der identifizierten kritischen Metalle und Kapitel 4 - Handlungsmöglichkeiten für metallische Rohstoffe.

Das zweite Kapitel dieser Arbeit befasst sich mit den kritischen Rohstoffen in den erneuerbaren Energieanlagen Österreichs. Dabei wird in einem ersten Schritt das Konzept der Kritikalität definiert. In einem zweiten Schritt wird aufbauend eine Metaanalyse zehn existierender Studien zur Kritikalität von Elementen durchgeführt. Hierbei werden internationale Studien, welche im Zeitraum von 2015 bis 2020 veröffentlicht wurden, berücksichtigt und jene Elemente analysiert, welche in diesen als kritisch eingestuft werden.

In einem dritten Schritt erfolgt die Vorauswahl aller in Österreich etablierten erneuerbaren Energietechnologien. Dabei wird mit Hilfe einer ersten groben Schätzung die Relevanz dieser Technologien hinsichtlich des Einsatzes kritischer Elemente in drei Stufen eingeordnet:

- (1) Hohe Relevanz: Technologien dieser Relevanzstufe werden in der Arbeit analysiert.
- (2) Mittlere Relevanz: Technologien dieser Relevanzstufe werden in Abhängigkeit des gegenwärtigen Bestandes entweder weiter analysiert oder nicht bearbeitet.
- (3) Keine Relevanz: Technologien dieser Relevanzstufe werden in der Arbeit nicht weiter analysiert.

In einem vierten Schritt erfolgt eine detaillierte Betrachtung der relevanten Technologien. Hierfür wurde die Marktsituation in Österreich näher untersucht und ein Marktmix aus den eingesetzten Technologien erstellt. Dieser Marktmix wurde wiederum durch bestimmte Indikatorprodukte gekennzeichnet. So wird beispielsweise ein 1,6 m² PV-Modul mit 60 Siliziumzellen zu 243 cm² und einer Dicke von 180 µm angenommen, um den Datenpool der Materialzusammensetzung einzugrenzen. Mithilfe von Ökobilanzierungen (Life Cycle Assessment – LCA) werden jene Materialien erfasst, die in den Energietechnologien verbaut sind. Für die Materialabschätzung von Windkraftanlagen (WKA) wurde eine LCA der Firma Vestas über die WKA Vestas V112-3.45 MW und eine LCA über die WKA Enercon E82 2,3MW von Zimmermann (2013) herangezogen, da die beiden Hersteller die größte Marktrelevanz in Österreich haben. Für die Materialabschätzung von Photovoltaikanlagen (PVA) wurde eine LCA von Frischknecht et al. (2020) herangezogen. Diese LCA wurde im Rahmen des IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS), eines der Forschungs- und

Entwicklungsabkommen der IEA zu deren Mitgliedern auch Österreich zählt, erstellt. Materialien in Solarthermieranlagen (STA) wurden basierend auf Handke & Kamburow (2009) ermittelt. Der Bericht von Handke & Kamburow (2009) basiert auf einer Studie, die im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) angefertigt wurde. In den Ökobilanzstudien werden jedoch auch Materialien erfasst, die als Reinigungsmittel, Betriebsmittel und Verpackungsmaterialien bei der Produktion anfallen. Ebenso werden Emissionen, Abfälle als auch der Energiebedarf für die Herstellung der Produkte in die Bilanz miteinbezogen. In dieser Arbeit werden diese Stoffe jedoch nicht berücksichtigt, weil der Fokus dieser Arbeit auf den Materialien liegt, die in den Produktsystem eingebaut sind. Nichtsdestotrotz bietet die Betrachtung eben dieser Materialien für künftige Arbeiten einen wichtigen Ansatz, und könnte dazu beitragen, die Ergebnisse dieser Arbeit weiter zu stärken.

In einem fünften und letzten Schritt soll ein erster Ausblick auf den zukünftigen Ausbau an erneuerbaren Energietechnologien in Österreich mittels einer Zeitreihenanalyse gegeben werden. Dabei wird der mengenmäßige Anteil der kritischen Rohstoffe bis zum Jahr 2040 prognostiziert.

Das gewählte univariate Prognosemodell dient als Ergänzung der vorangegangenen Arbeit zum Ist-Zustand an kritischen Rohstoffen und soll einerseits einen groben Ausblick geben sowie die in Kapitel 4 abgeleiteten Handlungsempfehlungen weiter untermauern. Da sich die Prognose auf Vergangenheitsdaten der Zeitreihe selbst stützt, wurde auf die exponentielle Glättung als Methodik zurückgegriffen. Diese hat den Vorteil, dass sie eines der einfachsten und am leichtesten nachzuvollziehenden univariaten Verfahren mit geringen Prognosekosten ist. Dabei wird unter Anwendung der Prognose-Funktion von Microsoft Excel der zukünftige Ausbau der erneuerbaren Energietechnologien in Österreich bis zum Jahr 2040 prognostiziert. Die Prognose-Funktion verwendet einen Prozess, der als dreifach exponentielles Glätten (ETS) bezeichnet wird, um ihre vorhandenen Daten zu übernehmen und basierend auf den historischen Werten Vorhersagen zu treffen. ETS gewichtet dabei jüngere Werte stärker als ältere. Im Detail wird davon ausgegangen, dass der zukünftige Ausbau an Rohstoffen im Mittelwert der letzten 3 Jahre liegt. Der Vorhersagewert ist also eine Fortsetzung der historischen Werte, wobei weiter zurückliegende Werte einen verhältnismäßig geringeren Einfluss haben.

Zu den größten Limitationen der gewählten Methode zählt die eingeschränkte Prognosegüte. Um die Prognosegüte zu verbessern, bedarf es weiterführender Forschung, welche jedoch den Rahmen dieser Masterarbeit sprengen würde. Mögliche Ansätze für künftige Forschung liefern beispielsweise multivariate Prognoseverfahren unter der Berücksichtigung weiterer politischer wie gesellschaftlicher Einflussfaktoren. Zu den effizientesten kausalen Verfahren zählen dabei die Indikator-Methode sowie die multivariate Regressionsanalyse (Hansmann, 1983, S. 12).

In Kapitel 3 erfolgt eine Detailanalyse der identifizierten kritischen Rohstoffe. In einem ersten Schritt wird die Geologie und Technologie der Metalle näher beschrieben. In einem zweiten Schritt wird auf ihre Eigenschaften, ihre Vorkommen und die Versorgungssituation in Österreich eingegangen, wobei der Materialverbrauch in den PVA, STA und WKA Österreichs für den Zeitraum 2020-2040 der globalen Jahresproduktion gegenübergestellt wird. Durch die Betrachtung der globalen Produktionsmengen kann die Verfügbarkeit

kritischer Rohstoffe eingeschätzt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Bevölkerungsanteil Österreichs an der Weltbevölkerung etwas über 0,1% liegt. Aus diesem Grund wird die Annahme getroffen, dass der Anteil Österreichs an den betrachteten kritischen Rohstoffen bei 0,1% liegt. Die untersuchten kritischen Rohstoffe finden nicht nur in erneuerbaren Energietechnologien Anwendung, sondern sind auch in anderen Technologien zu finden. Daher muss berücksichtigt werden, dass es auch andere konkurrierende Nachfragen nach diesen kritischen Rohstoffen gibt.

Abschließend werden in Kapitel 4 aufbauend auf einer Literaturrecherche Handlungsmöglichkeiten für metallische Rohstoffe abgeleitet und in Bezug auf ihre Effektivität und Realisierbarkeit beurteilt. Dabei wird vor allem die Rolle der verantwortlichen Akteure, insbesondere der Industrie und des Staates, näher beschrieben.

2. Kritische Rohstoffe in erneuerbaren Energietechnologien

Dieses Kapitel befasst sich mit den kritischen Rohstoffen in den erneuerbaren Energieträgern Österreichs. Zunächst wird das Konzept der Kritikalität näher beschrieben. Daraufhin folgt eine Metaanalyse 10 ausgewählter internationaler Kritikalitätsstudien, die im Zeitraum von 2015 bis 2020 veröffentlicht wurden. Weiters wird eine grobe Recherche über erneuerbare Energietechnologien hinsichtlich kritischer mineralischer Stoffe durchgeführt. Um Aufschluss über die in den erneuerbaren Energieanlagen Österreichs eingebauten Materialien zu erlangen, werden die in Betrieb befindlichen Anlagen und deren installierten Typen untersucht.

2.1 Das Konzept der Kritikalität

Laut Gunn (2014, S. 10) ist die Kritikalität eine Frage des Ausmaßes und daher kein binärer Zustand. Methoden zur Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen können sehr komplex sein und sind in der Regel multidimensional. So kann die Knappheit eines Rohstoffs von geologischen und ökonomischen Faktoren, technologischer Entwicklung, der Möglichkeit zur Substitution, Umweltauswirkungen und weiteren Faktoren abhängen. Aus diesem Grund werden in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedliche analytische Ansätze zur Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen verfolgt, weshalb die Ergebnisse in Bezug auf die Kritikalität von Rohstoffen auseinander gehen. Ebenso sei darauf hingewiesen, dass die Kritikalität eines Rohstoffes nicht für alle potenziellen Nutzer identisch ist (Gunn, 2014, S. 11).

Ein bedeutender Bericht zur Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen wurde im Jahr 2008 vom US National Research Council (2008) veröffentlicht. Laut dem National Research Council (2008, S. 4) hängt die Kritikalität eines Rohstoffes sowohl vom „Versorgungsrisiko“ als auch von den „Folgen einer Versorgungsunterbrechung“ ab.

Das Versorgungsrisiko ist von der geologischen Verfügbarkeit, politischen Faktoren, dem technologischen Fortschritt und anderen Faktoren abhängig (National Research Council, 2008, S. 113). Die Folgen der Versorgungsunterbrechung sind von der Substituierbarkeit, der Bedeutung in der Anwendung und weiteren Kriterien abhängig (National Research Council, 2008, S. 110–112). Die Methodik zur Bestimmung der Kritikalität wurde dabei nicht im Detail beschrieben, sondern zeigte den Versuch einer Annäherung zur Bestimmung der kritischen Rohstoffe. 11 Metalle wurden vom National Research Center als kritisch identifiziert, wobei Rhodium als am kritischsten und Kupfer als am wenigsten kritisch eingestuft wurde (National Research Council, 2008, S. 165).

Ein zweiter wichtiger Bericht zur Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen wurde von der Europäischen Kommission im Jahr 2009 initiiert und im Jahr 2010 veröffentlicht. Dabei wurde das Zwei-Achsen-Konzept des National Research Council beibehalten, wobei der Parameter „Folgen der Versorgungsunterbrechung“ durch den Parameter „Wirtschaftliche Bedeutung“ ersetzt wurde. Das Versorgungsrisiko ist wiederum von der politischen und ökonomischen Stabilität der produzierenden Länder, dem Grad der Rohstoffkonzentration in diesen Ländern, dem Substitutionspotenzial und der Recyclingrate abhängig. Ebenso wurden Umweltrisiken in die Bewertung miteinbezogen (KOM, 2010, S. 32).

Aufgrund des Interesses verschiedener Institutionen, Unternehmen und Regierungen in Bezug auf die Kritikalität von Rohstoffen wurde die Methodik zur Bestimmung der kritischen

Rohstoffe über die Jahre hinweg kontinuierlich verfeinert und über verschiedene Zeiträume angepasst (Gunn, 2014, S. 14).

2.2 Metaanalyse kritischer Rohstoffe

Zu Beginn wurde eine Metaanalyse durchgeführt, um den Einsatz kritischer mineralischer Ressourcen einschätzen zu können. Hierbei wurden internationale Studien berücksichtigt, die im Zeitraum von 2015 bis 2020 veröffentlicht wurden. Dabei wurde analysiert, welche Elemente in den einzelnen Studien als kritisch eingestuft werden. Bei der Durchführung dieser Kritikalitätsstudien wurden von den Autoren verschiedene Methoden angewandt, die von eingehenden Fallstudien (Schulz et al., 2017) über indikatorbasierte Modellierungen (McCullough und Nassar, 2017), bis hin zu einer Kombination von Methoden (z. B. Fortier et al., 2018) reichen. Ziel war es, einen Überblick über die Relevanz von kritisch eingestuften Ressourcen zu erhalten, unabhängig davon, nach welchen Kritikalitätsdefinitionen in den einzelnen Studien differiert wird.

Die Ergebnisse der einzelnen Studien sind in Tabelle 1 zusammengefasst. In dieser werden die untersuchten Kritikalitätsstudien in den Zeilen und die Elemente in den Spalten dargestellt. Betrachtet wurden in den gewählten Studien nur jene Elemente, deren Felder eine 0 („nicht kritisch“) oder eine 1 („kritisch“) enthalten. Diese Einteilung in 0 („nicht kritisch“) und 1 („kritisch“) widerspricht zwar dem Konzept der Kritikalität, jedoch können auf diese Weise Elemente identifiziert werden, die sich für die untersuchten erneuerbaren Energietechnologien als bedeutend herausstellen.

Zu den umfangreichsten zählt die von Fortier et al. (2018), in welcher insgesamt 52 Elemente untersucht und 34 als kritisch genannt wurden. Das Untersuchungsgebiet sind die USA. Zu den größten Studien für die EU zählt jene von Blengini et al. (2020). In dieser wurden 48 Elemente betrachtet und 27 als kritisch eingestuft.

Je häufiger ein Element als kritisch gilt, desto relevanter ist dieses Element für die in dieser Arbeit betrachteten erneuerbaren Energietechnologien. In Abbildung 2 ist die Relevanz der betrachteten Elemente auf einer Farbskala von weiß bis dunkelbraun dargestellt. Je dunkler ein Element eingefärbt ist, desto häufiger wurde dieses in den untersuchten Studien als kritisch genannt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Kritikalitätsstudien. Die von jeder Studie untersuchten Elemente sind mit einer "0" gekennzeichnet, während die als kritisch identifizierten Elemente durch eine "1" gekennzeichnet sind.

Kritikalitätsstudie	H	He	Li	Be	B	C	F	Mg	Al	Si	P	S	K	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag
BGS, 2015			1	1		1	1	1	0						0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1		1		0	0	1	1
Hatayama & Tahara, 2015									0								1	1	1	1	0	1	1								1	1	1	
Graedel et al., 2015			0	0	0			0	0					1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		0	0	1	0	0	1
Bortnikov et al., 2016			1	1										1						1				1	1		1		1	1		1		
Nassar et al., 2016		0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0		0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Schulz et al., 2017			1	1		1	1								1	1		1		1				1	1		1				1	1		
McCullough & Nassar, 2017		0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0		0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
Baranzelli et al., 2017		1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1		0			1		1	0	0
Fortier et al., 2018		1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
Blengini et al., 2020	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0		1	1	0	1	0	0
analysiert	1	5	9	9	6	7	6	7	8	5	5	5	5	5	8	8	8	9	8	10	8	8	8	9	9	6	9	3	7	7	7	10	8	8
kritisch	0	2	5	6	2	6	5	6	2	2	3	0	1	5	3	7	2	3	1	9	0	1	1	7	8	2	4	0	5	5	3	7	2	3

Kritikalitätsstudie	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	PGM	REE	betrachtet	kritisch	Region
BGS, 2015	1	1	0	1				1		1	1	1	0	1		0	1	0	0	1	1	40	25	Großbritannien
Hatayama & Tahara, 2015		1	1							1	1		1			1				1	1	19	17	Japan
Graedel et al., 2015	1	1	0	1	0			0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	44	14	nicht spezifiziert
Bortnikov et al., 2016	1	1			1					1		1			1		1				1	18	18	Russland
Nassar et al., 2016	0	0	0	1	0	0		0		0	1	0	0	1		0	1			1	1	47	11	nicht spezifiziert
Schulz et al., 2017		1	1	1	1			1	1	1		1								1	1	23	23	USA
McCullough & Nassar, 2017	0	1	0	1		0		0		1	1	1	0	1		0	1			1	1	47	19	nicht spezifiziert
Baranzelli et al., 2017		1	0	1	0			1	1	1	1	0	0			0	1			1	1	43	24	EU
Fortier et al., 2018	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0		0	1		1	1	1	52	34	USA
Blengini et al., 2020	0	1	0	1	0			1	1	1	1	0	0			0	1			1	1	48	27	EU
analysiert	7	10	9	8	7	3	1	8	5	10	8	9	8	5	2	8	8	2	3	9	10			
kritisch	3	9	2	8	3	0	1	5	4	8	7	6	2	4	2	1	8	0	1	9	9			

1 H	Nennungen als kritisch 01-23-45-67-89-10																2 He				
3 Li	4 Be	Ordnungszahl→1 H Wasserstoff ← relevant für ← Symbol ← Elementname ⚡Motoren/Generatoren ☀Sonnenenergie ⚡Batterien														5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og				

57
La

58
Ce

59
Pr

60
Nd

61
Pm

62
Sm

63
Eu

64
Gd

65
Tb

66
Dy

67
Ho

68
Er

69
Tm

70
Yb

71
Lu

89
Ac

90
Th

91
Pa

92
U

93
Np

94
Pu

95
Am

96
Cm

97
Bk

98
Cf

99
Es

100
Fm

101
Md

102
No

103
Lr

Abbildung 2: Kritikalität von Elementen nach Auswertung von 10 Studien (Baranzelli et al., 2017; BGS, 2015; Blengini et al., 2020; Bortnikov et al., 2016; Graedel et al., 2015; Hatayama & Tahara, 2015; McCullough & Nassar, 2017; Nassar et al., 2016; Schulz et al., 2017)

2.3 Vorauswahl der betrachteten Technologien

In einem zweiten Schritt wurde eine grobe Recherche über erneuerbare Energietechnologien hinsichtlich kritischer mineralischer Stoffe durchgeführt. Auf diese Weise konnte der Untersuchungsrahmen eingeschränkt und Technologien mit potenziell kritischen Rohstoffen ausfindig gemacht werden.

Tabelle 2: Potenzielle kritische mineralische Stoffe in erneuerbaren Energieanlagen (Eigene Darstellung) (Cichy, 2017; Handke & Kamburow, 2009; Marscheider-Weidemann et al., 2016; Viebahn et al., 2014)

Technologie	Kritische mineralische Stoffe
Solarenergie	
Photovoltaik	→ Dickschicht mit Silizium (Si) kritisch → Dünnschicht-Materialien sind insbesondere mit Indium (In), Germanium (Ge), Gallium (Ga), Cadmium (Cd), Tellur (Te) und Selen (Se) kritisch. → Kristalline Dickschichtmaterialien mit Ge, Ga, In und Se kritisch. → Kristalline Siliziumzellen mit Silber (Ag), Aluminium (Al), Kupfer (Cu) und Eisen (Fe)
Solarthermie	→ Cu und Al in Kollektoren
Windkraft	
	→ Neodym (Nd), Dysprosium (Dy), Praseodym (Pr), Terbium (Tb), Fe, Bor (B) in Generatoren, aber auch Kobalt (Co) und Mangan (Mn) zur Reduktion der Seltenerdverbräuche → (Stahl)-Legierungselemente für Masten und Getriebe (Chrom (Cr) und Molybdän (Mo))
Wasserkraft	→ ggf. (Stahl)-Legierungselemente
Geothermie	
Wärmepumpen	→ Keine bekannt
ORC-Kraftwerk	→ (Stahl)-Legierungselemente (Cr und Vanadium (V))
Bioenergie	
	→ Keine bekannten Stoffe in konventioneller Technik zur Stromerzeugung (BHKW, Dampfturbinen, Gasmotoren) oder Bereitstellung von Wärme (z.B.: Kessel, Thermen und Pelletierung) → Keine Relevanz bei innovativen Techniken (ORC, Stirling, etc.)

Ausgehend von diesen Ergebnissen werden die erneuerbaren Energietechnologien in drei Relevanzstufen eingeteilt. Die nachfolgende Tabelle gibt Aufschluss über die Kriterien zur Bestimmung der Relevanzstufe. In dieser Arbeit werden anschließend jene erneuerbaren Energietechnologien analysiert, die der Relevanzstufe „Hohe Relevanz“ zugeordnet werden können. Jene Technologien, die der Relevanzstufe „Mittlere Relevanz“ zugeordnet werden, werden in Abhängigkeit des österreichischen Marktes weiter untersucht. Alle übrigen

Technologien die der Relevanzstufe „Keine Relevanz“ zugeordnet werden, werden in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Tabelle 3: Kriterien zur Bestimmung der Relevanzstufe (Viebahn et al., 2014, S. 50)

Relevanzstufe		Kriterium zur Identifikation kritischer mineralischer Rohstoffe
Hohe Relevanz		Ein mineralischer Rohstoff ist in mehreren Studien als kritisch eingeschätzt worden
Mittlere Relevanz		Ein mineralischer Rohstoff wurde in ein bis zwei Studien als kritisch eingestuft
Keine Relevanz		Keiner der verwendeten mineralischen Rohstoffe wurde bisher in Studien als kritisch eingestuft

Tabelle 4: Relevanzeinschätzung für Technologien der erneuerbaren Energien hinsichtlich des Einsatzes mineralischer Rohstoffe (Viebahn et al., 2014, S. 51)

Technologie	Relevanzstufe
Solarenergie	
Photovoltaik	Hohe Relevanz 
Solarthermie	Mittlere Relevanz 
Windkraft	Hohe Relevanz 
Wasserkraft	Keine Relevanz 
Geothermie	
Wärmepumpen	Keine Relevanz 
ORC-Kraftwerk	Mittlere Relevanz 
Bioenergie	Keine Relevanz 

Die grobe Recherche hinsichtlich kritischer Rohstoffe in erneuerbaren Energietechnologien deutet darauf hin, dass mit der Photovoltaik und der Windkraft zwei der betrachteten Technologien eine hohe Relevanz einnehmen. Aus diesem Grund wird die Marktsituation dieser Technologien in Österreich näher untersucht und die in diesen Technologien enthaltenen kritischen Rohstoffe analysiert. Zwei weitere Technologien, die Solarthermie und die Geothermie, haben im Zuge einer ersten Recherche eine mittlere Relevanz eingenommen. Aufgrund der starken internationalen Positionierung Österreichs im Solarthermiebereich (Weiss & Spörk-Dür, 2020, S. 38) wird diese Technologie in Bezug auf ihren kritischen Materialeinsatz näher untersucht. Da sich die Verwendung kritischer Rohstoffe in der Geothermie auf die Verwendung von Stahllegierungselementen beschränkt (Viebahn et al., 2014, S. 77) und die zukünftige Energiepolitik der österreichischen Regierung keinen wesentlichen Ausbau der geothermischen Stromerzeugung sieht (Huttrer, 2020, S. 5), wird die Geothermie in dieser Arbeit nicht weiter analysiert. Allen übrigen Technologien wie der Wasserkraft, Wärmepumpen und Bioenergie, konnte in einer ersten groben Recherche keine Relevanz hinsichtlich kritischer Rohstoffe zugeschrieben werden, weshalb sie in dieser Arbeit

nicht näher beschrieben werden. Jedoch sei darauf hingewiesen, dass der Einsatz von Stahl bei allen erneuerbaren Energietechnologien eine wichtige Rolle einnimmt. Unlegierte Stähle enthalten neben dem kritischen Rohstoff Eisen die kritischen Elemente Silizium und Mangan. Legierte Stähle können kritische Rohstoffe wie etwa Chrom, Molybdän und Mangan enthalten, wobei niedrig legierte Stähle geringe Anteile an Legierungselementen enthalten und durch andere Materialien, wie etwa Beton- statt Stahltürmen bei Windturbinen, ersetzt werden können (Viebahn et al., 2014, S. 71).

2.4 Detailanalyse der erneuerbaren Energietechnologien Österreichs

Um Aufschluss über die in den erneuerbaren Energieanlagen Österreichs eingebauten Materialien zu erlangen, werden die in Betrieb befindlichen Anlagen und deren installierten Typen untersucht. Daten zu den Materialien in Photovoltaikanlagen (PVA) wurden Frischknecht et al. (2020) entnommen. Daten zu den Materialien in WKA wurden Razdan & Garrett (2017) und Zimmermann (2013) entnommen. Materialien in Solarthermieranlagen (STA) wurden basierend auf Handke & Kamburow (2009) ermittelt. Bei diesen Studien handelt es sich um Ökobilanzierungen (Life Cycle Assessment – LCA). In den Ökobilanzstudien werden jedoch auch Materialien erfasst, die als Reinigungsmittel, Betriebsmittel und Verpackungsmaterialien bei der Produktion anfallen. Ebenso werden Emissionen, Abfälle als auch der Energiebedarf für die Herstellung der Produkte in die Bilanz miteinbezogen. In dieser Arbeit werden diese Stoffe jedoch nicht berücksichtigt, weil der Fokus dieser Arbeit auf dem Ist-Zustand der eingebauten Rohstoffe in den Produktsystemen liegt. Nichtsdestotrotz ist die Betrachtung dieser Materialien für aufbauende Arbeiten von Bedeutung, da sich dadurch ein ganzheitlicheres Bild ergibt.

2.4.1 Solarthermie

Bei der solarthermischen Energiegewinnung werden Kollektoren verwendet, die Sonnenstrahlung in Wärmeenergie umwandeln und diese Energie zur späteren Nutzung in einen Speicher transportieren. Typischerweise werden solche Systeme für die Warmwassererzeugung eingesetzt, jedoch bestehen auch andere Anwendungsmöglichkeiten (Evangelisti et al., 2019, S. 2). Die Solarthermie konnte in Österreich in den 1980er Jahren im Sektor der Warmwasserbereitung und dem Beheizen von Schwimmbädern erstmals Erfolge verzeichnen. Anfang der 1990er Jahre wurde der Raumheizungssektor für die thermische Solarenergie erschlossen. Es kam zu einer Phase starken Wachstums in dieser Branche, welcher 2009 seinen Höhepunkt erreichte. Seitdem sind Investitionen in diese Anlagen wieder rückläufig. Diese Entwicklung lässt sich auf die Komplexität der Anlagen, die relativ hohen Preise im niederen Leistungsbereich, den rasant gesunkenen Preisen in der Photovoltaik, dem erhöhten Druck des Eigenstromverbrauchs aus diesen Anlagen, dem Ausbau von Wärmepumpen und den niedrigen Preisen für fossile Energie, zurückführen (Biermayr et al., 2019, S. 139). Dennoch nimmt Österreich im internationalen Vergleich eine führende Rolle in der in Betrieb befindlichen Sonnenkollektorenfläche ein. So befindet sich Österreich aktuell an achter Stelle bezüglich der in Betrieb befindlichen absoluten Sonnenkollektorenfläche (Weiss & Spörk-Dür, 2020, S. 38).

In Betrieb befindliche Anlagen

Im Jahr 2019 waren insgesamt 5.050.403 m² Sonnenkollektorenfläche mit einer Leistung von 3.535 MW_{th} installiert (Biermayr et al., 2019, S. 143). Tabelle 5 gibt Aufschluss über die installierte Sonnenkollektoren-Fläche in m² und die installierten Sonnenkollektoren in MW_{th} ab dem Jahr 1995.

Es gibt zwei Arten von Sonnenkollektoren: Nicht-konzentrierende und konzentrierende Sonnenkollektoren (Evangelisti et al., 2019, S. 2; Kalogirou, 2004, S. 240). Nicht-konzentrierende Kollektoren nutzen die gleiche Fläche zum Auffangen und zur Absorption der Sonnenstrahlung. Konzentrierende Kollektoren verfügen in der Regel über konkave Reflexionsflächen, um die Sonnenstrahlung abzufangen und auf eine kleinere Empfangsfläche zu fokussieren, wodurch der Strahlungsfluss erhöht wird (Kalogirou, 2004, S. 240). Abbildung 3 gibt einen Überblick über die Klassifizierung von solarthermischen Kollektoren.

Die in Österreich installierten Sonnenkollektoren gehören alle dem nicht-konzentrierendem bzw. stationärem Typus an. Mit Ende des Jahres 2019 entfielen in Österreich 4.677.407 m² (3.274 MW_{th}) auf verglaste Flachkollektoren, 282.065 m² (197 MW_{th}) auf unverglaste Flachkollektoren, 85.482 m² (60 MW_{th}) auf Vakuumrohr-Kollektoren und 5.448 m² (4 MW_{th}) auf Luftkollektoren (Biermayr et al., 2019, S. 143). Die im Jahr 2018 installierten STA verteilen sich auf verschiedene Bereiche. Im Jahr 2019 stellt der Bereich der Einfamilienhäuser (EFH) mit 55% den größten Markt dar. Mit 38% stellen Mehrfamilienhäuser (MFH) den zweitgrößten Markt für STA dar. 4% der STA wurden im Gewerbe- und Industriebereich installiert. 3% der installierten Anlagen verteilten sich auf Hotel- und Freizeitbetriebe (Biermayr et al., 2019, S. 144).

Tabelle 5: Jährlich installierte Kollektorfläche (m²) und Kollektorleistung (MW_{th}) in Österreich ab dem Jahr 1995 (Eigene Darstellung) (Biermayr et al., 2019, S. 141–142)

Jahr	Unverglaster Flachkollektor		Verglaster Flachkollektor		Vakuumrohr-Kollektor		Luftkollektor		Gesamt	
	m ²	MW _{th}	m ²	MW _{th}	m ²	MW _{th}	m ²	MW _{th}	m ²	MW _{th}
1995	42.860	30,0	155.980	109,2	4.680	3,3			203.520	142,5
1996	32.000	22,4	184.200	128,9	2.600	1,8			218.800	153,2
1997	39.900	27,9	176.480	123,5	2.860	2,0			219.240	153,5
1998	32.302	22,6	163.024	114,1	2.640	1,8			197.966	138,6
1999	16.920	11,8	138.750	97,1	2.398	1,7			158.068	110,6
2000	14.738	10,3	150.543	105,4	2.401	1,7			167.682	117,4
2001	9.067	6,3	157.860	110,5	2.220	1,6			169.147	118,4
2002	10.550	7,4	151.000	105,7	2.050	1,4			163.600	114,5
2003	9.900	6,9	165.200	115,6	1.720	1,2			176.820	123,8
2004	8.900	6,2	180.000	126,0	2.594	1,8			191.494	134,0
2005	6.070	4,2	235.148	164,6	1.857	1,3			243.075	170,2
2006	6.935	4,9	289.745	202,8	2.924	2,0			299.604	209,7
2007	8.662	6,1	277.620	194,3	3.399	2,4			289.681	202,8
2008	15.220	10,7	343.617	240,5	4.086	2,9			362.923	254,0
2009	8.342	5,8	348.408	243,9	7.759	5,4	378	0,3	364.887	255,4
2010	5.539	3,9	268.093	187,7	11.805	8,3	350	0,2	285.787	200,1
2011	5.700	4,0	234.500	164,2	8.690	6,1	350	0,2	249.240	174,5
2012	2.410	1,7	200.800	140,6	5.590	3,9	830	0,6	209.630	146,8
2013	1.460	1,0	175.140	122,6	4.040	2,8	1.010	0,7	181.650	127,2
2014	1.340	0,9	150.530	105,4	2.910	2,0	390	0,3	155.170	108,6
2015	890	0,6	134.260	94,0	2.320	1,6	270	0,2	137.740	96,4
2016	760	0,5	109.600	76,7	1.440	1	130	0,1	111.930	78,4
2017	630	0,4	99.770	69,8	1.060	0,7	320	0,2	101.780	71,2
2018	510	0,4	97.100	68,0	1.130	0,8	650	0,4	99.390	69,6
2019	460	0,3	90.040	63,1	310	0,2	770	0,5	91.580	64,1
Gesamt	282.065	197	4.677.407	3.274	85.482	60	5.448	4	5.050.403	3.535

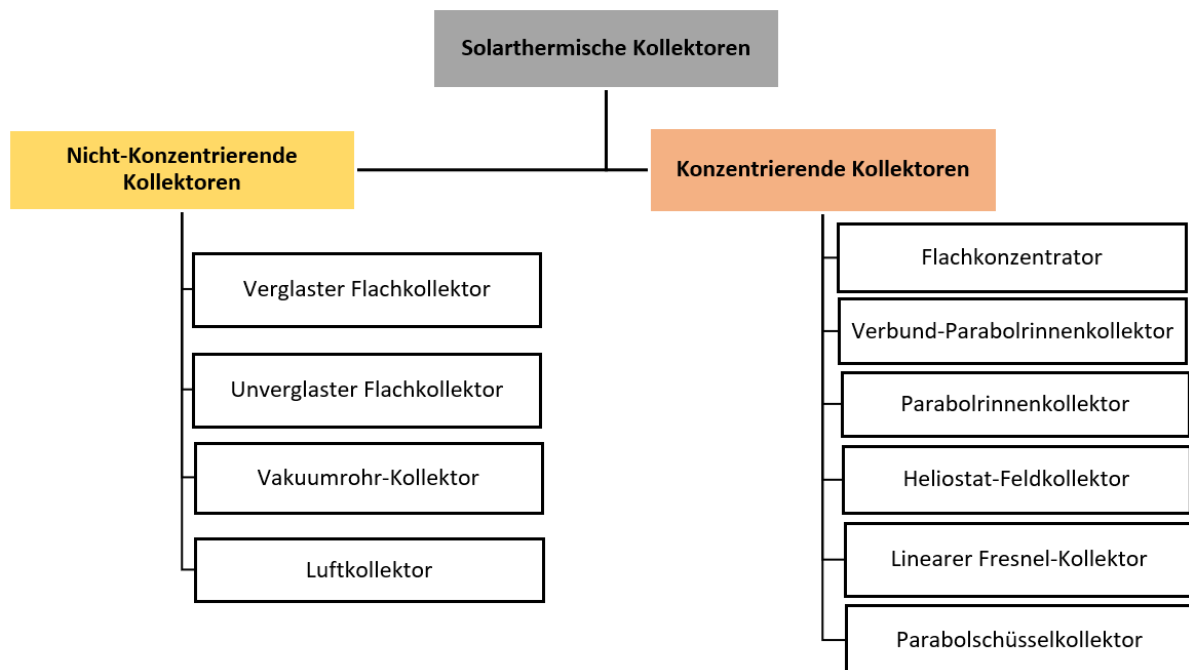


Abbildung 3: Überblick über unterschiedliche Kollektor-Technologien (Eigene Darstellung) (Evangelisti et al., 2019, S. 2)

Abbildung 4 zeigt, dass der Mix an Kollektor-Typen in Österreich über die Jahre hinweg abgenommen hat. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts nahmen die unverglasten Flachkollektoren einen bedeutenden Anteil an der gesamt installierten Fläche ein. Diese wurden in erster Linie zur Schwimmbaderwärmung eingesetzt (Biermayr et al., 2019, S. 139). Ab dem Jahr 2006 zeigte sich ein Trend hin zu Vakuumrohr-Kollektoren, der ab dem Jahr 2010 wieder abnahm. Die Luftkollektoren zeigten als einzige Kollektor-Technologie einen Marktzuwachs in den vergangenen Jahren. So stieg die installierte Fläche von 130 m² im Jahr 2016 auf 770 m² im Jahr 2019. Der Höchstwert von 1.010 m² aus dem Jahr 2013 wurde jedoch nicht mehr erreicht (Biermayr et al., 2019, S. 141). Verglaste Flachkollektoren nahmen im Jahr 2019 mit einem Anteil von 90.040 m² bzw. 63,1 MW_{th} den größten Anteil der gesamt installierten Kollektorfläche von 91.580 m² bzw. 64,1 MW_{th} ein, weshalb unverglaste Flachkollektoren, Vakuumrohr-Kollektoren und Luftkollektoren in dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden. (Biermayr et al., 2019, S. 139).

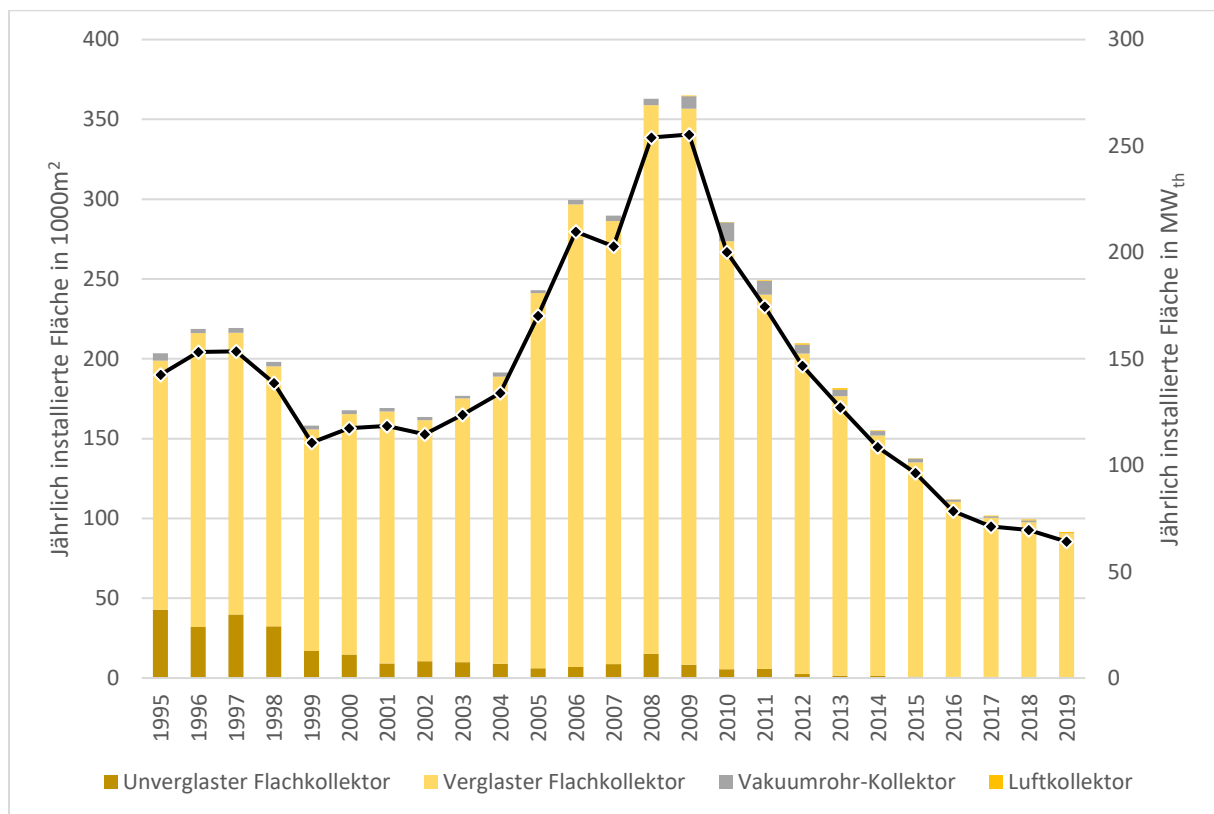


Abbildung 4: Jährlich installierte Kollektorfläche und Kollektorleistung nach Kollektor-Typen (Eigene Darstellung) (Biermayr et al., 2019, S. 140)

Materialzusammensetzung von solarthermischen Anlagen mit verglasten Flachkollektoren

STA bestehen neben dem Kollektor aus dem Solarspeicher, dem Expansionsgefäß, einem Rohrsystem, einer Umwälzpumpe und Regelungsaggregaten, welche unter anderem die elektronische Steuerung enthalten. Um die Strahlungseigenschaften zu verbessern, werden die Absorber in den Kollektoren mit ausgewählten Oberflächen beschichtet. Diese werden meistens galvanisch als Schwarzverchromung auf die Absorber aufgetragen (Handke & Kamburow, 2009, S. 40). Hinsichtlich der Absorbermaterialien dominiert Kupfer mit einem Anteil von 97% den Markt. Daneben existieren jedoch auch Absorber aus Aluminium oder einer Mischung aus Aluminium und Kupfer. Außerdem gibt es Absorber aus Edelstahl, die in unverglasten Kollektoren eingesetzt werden (Handke & Kamburow, 2009, S. 31). Hinsichtlich der Rahmenkonstruktion setzen die meisten Hersteller auf einwandige Rahmen aus Aluminium. Der Einsatz von Kunststoff, Edelstahl und verzinktem Stahlblech stellt beim Bau von Rahmen eher die Ausnahme dar. Für die Abdeckung solarthermischer Kollektoren ist eisenarmes Solarglas Mindeststandard. Aufgrund des geringen Anteils an Eisenoxid ist dieses Material besonders strahlungsdurchlässig (Handke & Kamburow, 2009, S. 32). Das Gewicht von Solarspeichern kann je nach Ausführung zwischen 270 kg bei 450 L und 483 kg bei 3000 L Speichervolumen liegen, wobei legierte Stähle (Chrom-Nickel-Stahl (71Fe16Cr13Ni)) mit einem Massenanteil von etwa 90% dominieren. Die restlichen 10% verteilen sich auf Mineral- bzw. Glaswolle als Dämmungsmaterial (Handke & Kamburow, 2009, S. 41). In der Berechnung der Masse des Solarspeichers wird für EFH daher ein Gewicht von 270 kg angenommen. Für MFH wird eine Masse von 483 kg pro Solarspeicher angenommen.

Das Gewicht von Expansionsgefäßen kann je nach Gesamtvolumen zwischen 6 kg (25 L) und 14 kg (80 L) liegen (Handke & Kamburow, 2009, S. 41). In der Berechnung des Materialeinsatzes wird daher für EFH eine Masse von 6 kg und für MFH eine Masse von 14 kg pro Expansionsgefäß angenommen. Ähnlich wie beim Solarspeicher wird auch beim Expansionsgefäß der Materialeinsatz von Stahl dominiert, weshalb der Stahleinsatz für die Berechnung mit 100% festgelegt wird. Für den Bau des Rohrsystems werden je nach Situation unterschiedliche Rohrlängen benötigt. Für Einfamilienhäuser (EFH) werden typischerweise 40 m Rohrlänge gebraucht. Für Mehrfamilienhäuser (MFH) werden in etwa 114 m Rohr benötigt. Der Materialeinsatz kann aufgrund dieser Tatsache divergieren. So werden bei EFH 46 kg und bei MFH 430 kg Material verbaut. Der Materialeinsatz für die Installation des Rohrsystems verteilt sich zu 60% auf Stahl, 30 bis 40% auf Kupfer und 5 bis 10% auf Glas- oder Mineralwolle (Handke & Kamburow, 2009, S. 41). Für die Berechnung der spezifischen Massen wird daher ein Materialeinsatz von 60% Stahl, 35% Kupfer und 5% Glas- oder Mineralwolle angenommen. Das Rohrsystem wird durch weitere Bestandteile zum Absperren, Befüllen und Entlüften der Anlage ergänzt. Die Materialeinsätze für diese Komponenten können dabei erheblich schwanken. Zu den Anlagenkomponenten mit geringer spezifischer Masse zählen die Umwälzpumpe und die Regelungsaggregate. Im Unterschied zu den anderen Anlagenkomponenten weisen diese jedoch verschiedene metallische Legierungen, unterschiedliche Kunststoffe und elektronische Bauteile auf. Diese Komponenten sind ihrerseits in ihrer stofflichen Zusammensetzung sehr heterogen aufgebaut (Handke & Kamburow, 2009, S. 41). Aufgrund der fehlenden Daten zu diesen Vorrichtungen werden diese nicht in die Analyse miteinbezogen.

Um die Datenmenge der Materialeinsätze für die unterschiedlichen Kollektoren-Typen einzugrenzen, wird der österreichische STA-Markt durch verschiedene Indikatorprodukte dargestellt. Es wird eine durchschnittliche Fläche von $9,1 \text{ m}^2$ pro STA angenommen (Handke & Kamburow, 2009, S. 26). Um die Stahlmengen für den Solarspeicher, das Expansionsgefäß und das Rohrsystem darzustellen, werden diese je nach Einsatzbereich (EFH und MFH) entsprechend zugeordnet. Als Bezugsjahr für die Berechnung wird das Jahr 2019 ausgewählt, weshalb davon ausgegangen wird, dass 55% der STA in EFH und 45% der STA in MFH installiert sind. Tabelle 6 zeigt den Materialeinsatz für eine STA mit verglastem Flachkollektor, aufgeteilt nach deren Hauptkomponenten.

Tabelle 6: Materialzusammensetzung einer solarthermischen Anlage mit verglastem Flachkollektor (Handke & Kamburow, 2009, S. 40)

Solarthermische Anlage		
Systemkomponenten	Hauptkomponenten	Materialien
Flachkollektor	Beschichtung	Galvanik
	Absorber	Kupfer
	Rahmen	Aluminium
	Dämmung	Mineralwolle
	Dichtung der Abdeckung	EPDMA
	Abdeckung	Glas
	Lötmaterial	Cd-freies Hartlot
Solarspeicher		Stahl, Mineral-/Glaswolle
Expansionsgefäß		Stahl
Rohrsystem		Stahl, Kupfer, Mineral-/Glaswolle
Umwälzpumpe		-
Regelungsaggregate		-

Um die sekundären Materialströme in den STA Österreichs zu berechnen, wurde der Materialbedarf der Systemkomponenten und der einzelnen Materialien in kg/m² berechnet. Die nachfolgende Tabelle 7 gibt Auskunft über die Zusammensetzung einer STA mit verglastem Flachkollektor.

Tabelle 7: Zusammensetzung einer durchschnittlichen STA nach Anwendungsbereich, Systemkomponenten und Materialien in kg/m² (Handke & Kamburow, 2009, S. 40)

Solarthermische Anlage		
Anwendungsbereich	EFH	MFH
Systemkomponenten		
Flachkollektor	19,5E+0	19,5E+0
Solarspeicher	29,6E+0	53,0E+0
Expansionsgefäß	6,5E -1	1,5E+0
Rohrsystem	5,0E+0	47,2E+0
Umwälzpumpe	-	-
Regelungsaggregate	-	-
Materialien		
Kupfer	4,5E+0	19,3E+0
Aluminium	3,5E+0	3,5E+0
Mineral-/Glaswolle	5,5E+0	10,0E+0
EPDMA	8,3E -1	8,3E -1
Glas	9,9E+0	9,9E+0
Cd-freies Hartlot	2,2E -2	2,2E -2
Stahl (71Fe16Cr13Ni)	30,3E+0	77,6E+0
Eisen	21,5E+0	55,1E+0
Chrom	4,8E+0	12,4E+0
Nickel	3,9E+0	10,1E+0

Tabelle 7 zeigt, dass Stahl (71Fe16Cr13Ni) zum massenreichsten Material einer STA zählt. Kupfer, Aluminium, Glas als auch Mineralwolle nehmen einen ebenso bedeutenden Teil an der Gesamtmasse einer STA ein. Ebenso zeigt sich, dass bezogen auf die Fläche mehr Material in MFH eingesetzt wird, was wiederum auf ein vergrößertes Rohrsystem als auch auf einen größeren Solarspeicher zurückzuführen ist.

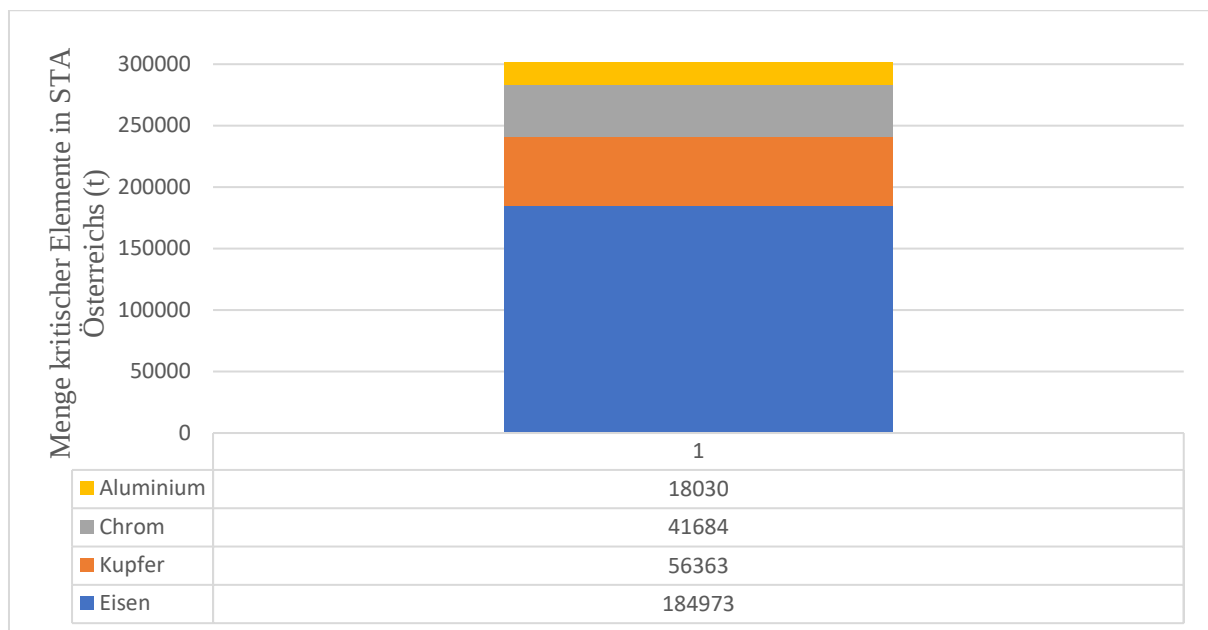


Abbildung 5: Ermittelte Materialmenge kritischer Elemente in STA Österreichs (in t)

Abbildung 5 zeigt, dass Eisen, Kupfer, Chrom und Aluminium zu den kritischen Rohstoffen in den STA Österreichs zählen. Eisen (184.973 t) nimmt dabei den größten Anteil ein, gefolgt von Kupfer (56.363 t), Chrom (41.684 t) und Aluminium (18.030 t).

2.4.2 Photovoltaik

Aufgrund der Elektrizitätsstatistikverordnung 2016 sind alle österreichischen Netzbetreiber verpflichtet, die installierte PV-Leistung ihrer Netze an die E-Control zu übermitteln. Aufgrund der Tatsache, dass Photovoltaikanlagen zu Beginn der 1990er Jahre vertrieben wurden, kann davon ausgegangen werden, dass kein hoher Anteil der Anlagen bis 2019 außer Betrieb genommen wurde, da die zu erwartende Lebensdauer solcher Anlagen zwischen 25 und 30 Jahren liegt (Biermayr et al., 2019, S. 107). Aus diesem Grund werden alle Anlagen ab den 1990er Jahren in die Analyse mit einbezogen.

In Betrieb befindliche Anlagen

Im Jahr 2019 waren insgesamt 138.715 netzgekoppelte Anlagen mit einer Leistung von 1.694,396 MW_p installiert. Zuzüglich der autarken Anlagen ergibt sich eine Leistung von 1.702,093 MW_p (Biermayr et al., 2019, S. 143). Tabelle 8 gibt einen Überblick über die installierte PV-Leistung und die installierte Anlagenzahl von 1992 bis 2019.

Tabelle 8: Gesamte installierte PV-Leistung und Anlagenzahl von 1992 bis 2019 (E-Control, 2020)

Jahr	Jährlich installierte PV-Leistung in kW _p			Installierte netzgekoppelte Anlagen
	Netzgekoppelt	Autark	Summe	
Bis 2002	8.357	1.962	10.319	277
2003	6.303	169	6.472	1.538
2004	3.755	514	4.269	58
2005	2.711	250	2.961	46
2006	1.290	274	1.564	79
2007	2.061	55	2.116	508
2008	4.553	133	4.686	591
2009	19.961	248	20.209	1.622
2010	42.695	207	42.902	738
2011	90.984	690	91.674	4.918
2012	175.493	220	175.712	8.793
2013	262.621	468	263.089	22.647
2014	158.974	299	159.273	28.277
2015	151.806	46	151.851	14.290
2016	154.802	952	155.754	14.047
2017	172.479	476	172.955	12.029
2018	185.927	234	186.161	12.799
2019	246.461	500	246.961	15.458
Summe	1.694.396	7.697	1.702.093	138.715

Photovoltaikzellen werden in 3 Typen unterteilt, welche unterschiedliche Halbleitermaterialien nutzen (Benedek et al., 2014, S. 236). Abbildung 6 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Photovoltaiktechnologien.

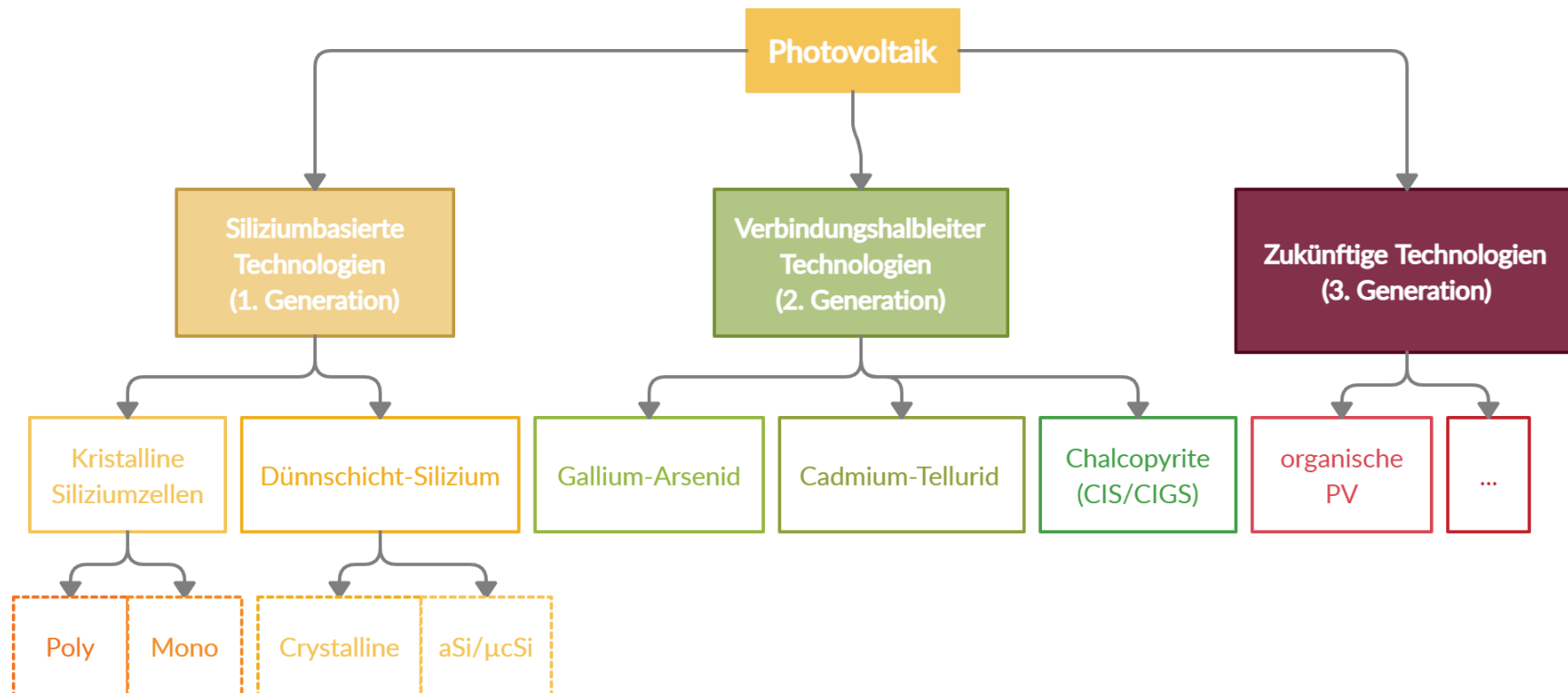


Abbildung 6: Überblick über unterschiedliche PV-Technologien (Eigene Darstellung) (Wade 2013 zitiert in (Benedek et al., 2014, S. 236))

Seit 2003 werden Aufzeichnungen zu den installierten Solarzellentypen in Österreich geführt. In Österreich wurden im Jahr 2019 vor allem polykristalline Siliziumzellen mit einem Marktanteil von etwa 74%, gefolgt von monokristallinen Siliziumzellen mit etwa 26%, installiert (Biermayr et al., 2019, S. 109). Dabei wurden die sogenannten HIT-Solarzellen („Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer“) den monokristallinen Solarzellen zugeordnet, „da ihr interner Zellaufbau neben kristallinem auch amorphes Silizium beinhaltet, sie aber über andere Elektrodenmaterialien verfügen“ (Scherhauser et al., 2020, S. 3). Dünnschichtzellen aus Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) haben in Österreich mit einem Marktanteil von unter 1% eine vergleichsweise geringe Bedeutung (Biermayr et al., 2019, S. 109). Ebenso weisen Dünnschicht-Zellen aus amorphem Silizium einen sehr geringen Marktanteil auf (Biermayr et al., 2019, S. 109). Aus diesem Grund werden für die Analyse die polykristallinen Siliziumzellen näher untersucht. CdTe-Zellen, CI(G)S-Zellen als auch Zellen aus amorphem Silizium werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass CI(G)S-Zellen das chemische Element Indium enthalten, welches in 9 der 10 Kritikalitätsstudien als kritisch eingestuft wurde. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Entwicklung des österreichischen PV-Bestandes ab dem Jahr 2010.

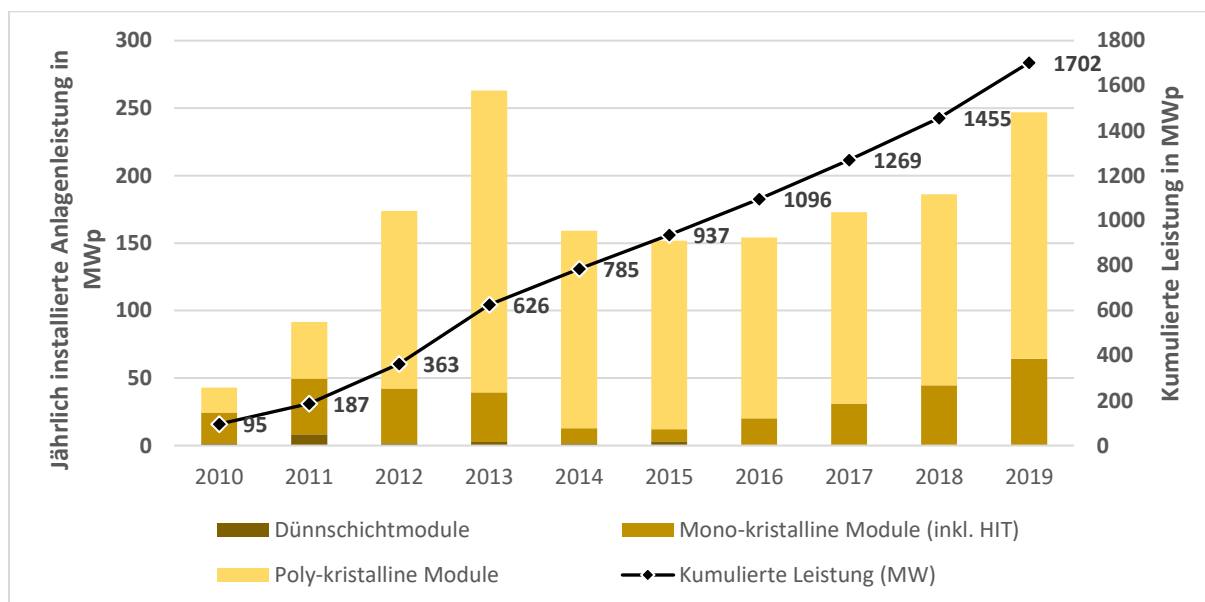


Abbildung 7: Jährlich in Österreich installierte Leistung und kumulierte Leistung nach Technologien (Eigene Darstellung) (Biermayr et al., 2019, S. 106–109)

Nach Biermayr et al. (2019, S. 110) wurden im Jahr 2019 87,07% aller installierten PVA in Form einer Aufdach-Montage realisiert. Freistehende Anlagen wurden mit einem Anteil von 7,26%, dachintegrierte Anlagen mit einem Anteil von 2,99% und fassadenintegrierte Anlagen mit einem Anteil von 0,41% errichtet. Aus diesem Grund wird in der Arbeit die Materialzusammensetzung einer PVA im Sinne der Aufdach-Montage analysiert. Alle anderen Montage-Systeme werden in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Materialzusammensetzung von kristallinen Siliziumzellen

Die Systemkomponenten einer PVA sind das PV-Modul, die BOS-Komponenten (Balance of System) und der Energiespeicher. Um die Installation einfach zu halten und der PVA die nötige Robustheit zu verleihen, benötigen Siliziummodule in der Regel einen Aluminiumrahmen von 2,1 kg pro m² Fläche. Um die Materialströme zu berechnen, wurde ein 1,6 m² PV-Modul mit 60 Siliziumzellen zu 243 cm² und einer Dicke von 180 µm angenommen (Frischknecht et al., 2020, S. 17). Das BOS umfasst bei einer Aufdach-Montage in der Regel den Wechselrichter, Verkabelung, Verbindungen und die Halterung (Frischknecht et al., 2020, S. 18). Laut Frischknecht et al. (2020, S. 57-58) besitzt ein Wechselrichter mit 5 kW Nennleistung ein durchschnittliches Gesamtgewicht von 23 kg. Ein solcher Wechselrichter dient als Grundlage für die Berechnung der Materialmengen. Die Stahlmengen einer PVA setzen sich zum Großteil aus niedrig legiertem Stahl zusammen. Niedrig legierter Stahl ist durch sehr geringe Mengen an Legierungselementen gekennzeichnet und kann häufig durch andere Materialien ersetzt werden.

In dieser Arbeit wird der Baustahl EN24T als verwendeter Baustahl für die Photovoltaik angenommen. Es handelt sich hierbei um einen hochfesten Stahl, der Nickel, Chrom und Molybdän als Legierungselemente enthält. Im Detail setzt sich dieser Stahl zu 95,75% aus Eisen, zu 0,4% aus Kohlenstoff, zu 0,225% aus Silizium, zu 0,575% aus Mangan, zu 0,035% aus Phosphor, zu 0,04% aus Schwefel, zu 0,275% aus Molybdän, zu 1,2% aus Chrom und zu 1,5% aus Nickel zusammen (metals4U, 2021).

Energiespeicher umfassen eine Li-Ionen-Batterie, ein Batterie-Management-System, ein Batterie-Kühlsystem und eine Batterie-Verpackung (Frischknecht et al., 2020, S. 60). Da in Österreich mit Ende des Jahres 2017 erst 3.995 Anlagen mit Heimspeichersystemen ausgestattet waren (Fischer & Leonhartsberger, 2019, S. 5), wird die Materialzusammensetzung des Energiespeichers in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

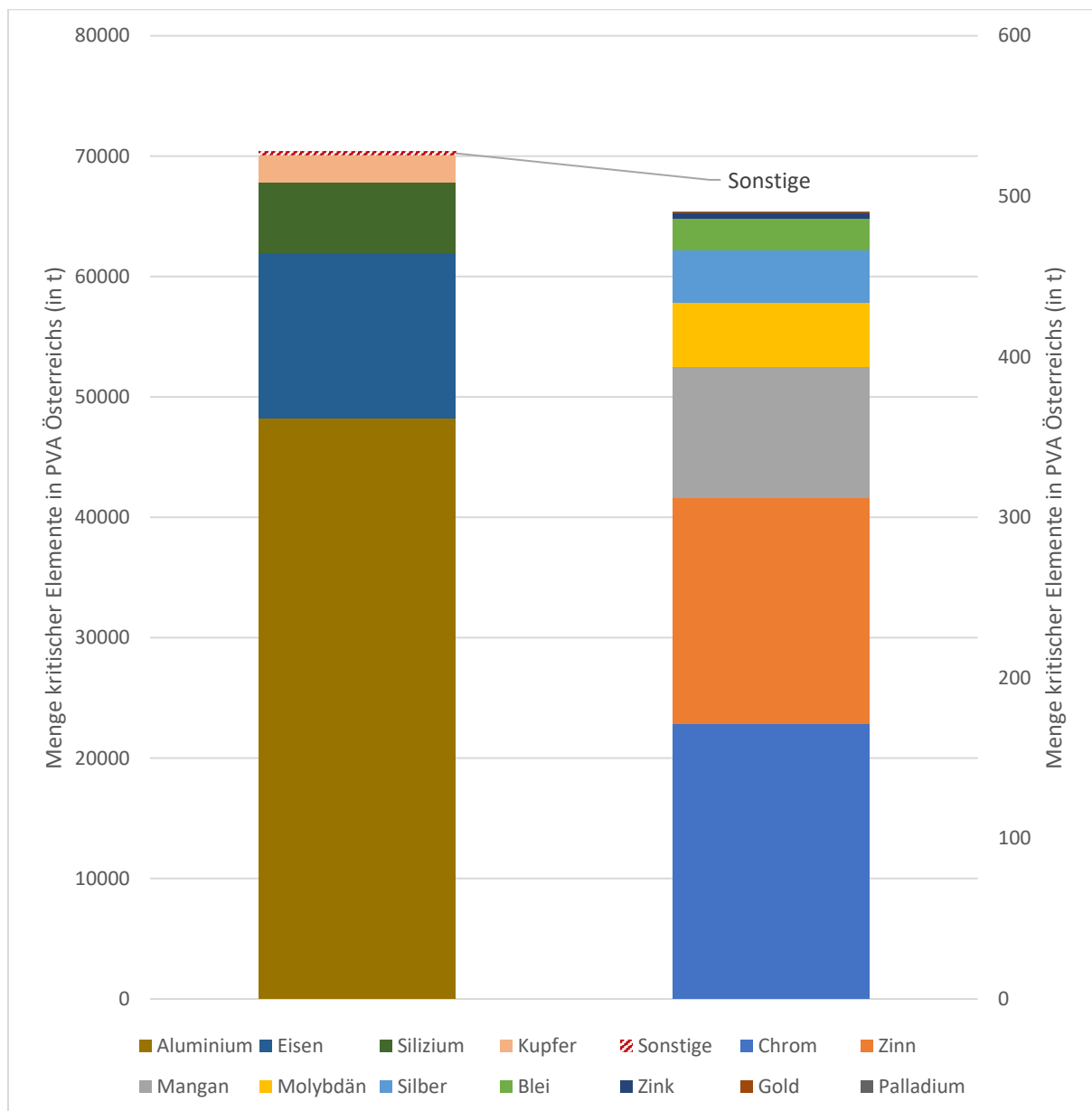
Tabelle 9 gibt einen Überblick über die typische Materialzusammensetzung einer PVA mit siliziumbasierter Technologie. Tabelle 10 zeigt die Zusammensetzung einer PVA nach Hauptkomponenten und Materialien in kg/kWp.

Tabelle 9: Materialzusammensetzung einer PVA mit siliziumbasierter Technologie nach System-, Haupt- und Subkomponenten und Materialien (Frischknecht et al., 2020; Scherhauser et al., 2020)

Photovoltaik-Anlage			
Systemkomponenten	Hauptkomponenten	Subkomponenten	Materialien
PV-Modul	PV-Zelle	Wafer	Si
		Metallisation-Paste	Al, Cu, Pb, Ag, Sn
		Einkapselung	EVA
	Glasabdeckung		Glas
	Rahmen		Al
	Verbindungen		Ag
	Anschlussbox		Polymere
BOS-Komponenten	Wechselrichter	Kondensator	Al, Cu, Fe, Pb, Ni, P, Ag, Zn, Sn, Pd
		Induktor	Fe, Cu, Pb, Sn
		Schaltung	Cu, Ni, Au, Si, Al, Ag, Sn, Pb, P, Fe
		Stecker	Messing
		Klemmverb.	Cu
		Transistor	Al, Fe, Cu, Ni, Pb, Sn
		Diode	Pb, Cu, Mo, Sn
		Leuchtdiode (LED)	Pb, Fe, Cu, Ni, Sn, Mo
		Widerstand	Fe, Cu, Al, Ni, Sn, Pb, Cr, Si, Pd, Ag, Au
		Transformator	Cu, Fe
	Verkabelung		Cu, Sn, TPE
	Verbindungen		Fe
	Halterung		Fe, HDPE, Stahl

Tabelle 10: Zusammensetzung einer PVA mit siliziumbasierter Technologie nach Hauptkomponenten und Materialien in kg/kWp

Photovoltaik-Anlage	
Hauptkomponenten	
PV-Modul	73,3E+0
Wechselrichter	1,4E+0
Verkabelung	8,3E-1
Halterung	24,9E+0
Materialien	
Kupfer	1,3E+0
Eisen	1,1E-2
Blei	1,1E-2
Zinn	8,2E-2
Nickel	3,7E-4
Gold	3,0E-4
Silizium	3,4E+0
Aluminium	28,3E+0
Silber	1,9E-2
Zink	1,8E-3
Phosphor	2,2E-4
Molybdän	4,0E-5
Chrom	5,3E-7
Palladium	9,9E-7
Stahl (EN24T)	8,4E+0
Eisen	8,0E+0
Chrom	1,0E-1
Mangan	4,8E-2
Molybdän	2,3E-2
Silizium	1,9E-2
Restliche Zusammensetzung	2,1E-1
Andere Materialien	58,8E+0



Kupfer	2229,8
Silizium	5890,9
Eisen	13708,7
Aluminium	48253,4
Sonstige:	
Palladium	0,0017
Gold	0,52
Zink	3,1
Blei	19,7
Silber	32,9
Molybdän	39,4
Mangan	82,2
Zinn	140,4
Chrom	171,6

Abbildung 8: Ermittelte Materialmenge kritischer Elemente in PVA Österreichs (in t)

Abbildung 8 zeigt, dass Chrom, Zinn, Mangan, Molybdän, Silber, Blei, Zink, Gold, Palladium, Aluminium, Eisen, Silizium und Kupfer zu den kritischen Rohstoffen in den PVA Österreichs zählen. Zu den massenreichsten Metallen zählen Aluminium (48.253 t), Eisen (13.708 t), Silizium (5.891 t) und Kupfer (2.230 t).

2.4.3 Windkraft

In Betrieb befindliche Anlagen

Im Jahr 2018 wuchs die in Österreich installierte Gesamtleistung der Windkraft erstmals auf über 3 GW an. Die im Jahr 2019 installierten WKA wurden im Osten Österreichs errichtet. So entfielen 21 Anlagen (62,3 MW) auf Niederösterreich, 20 Anlagen (66,3 MW) auf das Burgenland und 8 Anlagen (23,8 MW) auf die Steiermark. Am Ende des Jahres 2019 waren somit in Österreich 1.340 WKA netzgekoppelt. Dies entspricht einer Nennleistung von 3.160 MW. Mit dieser Leistung können jährlich 7,3 TWh Strom produziert werden, womit 11% des heimischen Strombedarfs gedeckt werden können. Dennoch ist der Ausbau der Windkraft seit dem Jahr 2014 stetig zurückgegangen. Abbildung 9 zeigt den Ausbau der Windkraft ab dem Jahr 1994 in Österreich (Biermayr et al., 2019, S. 209).

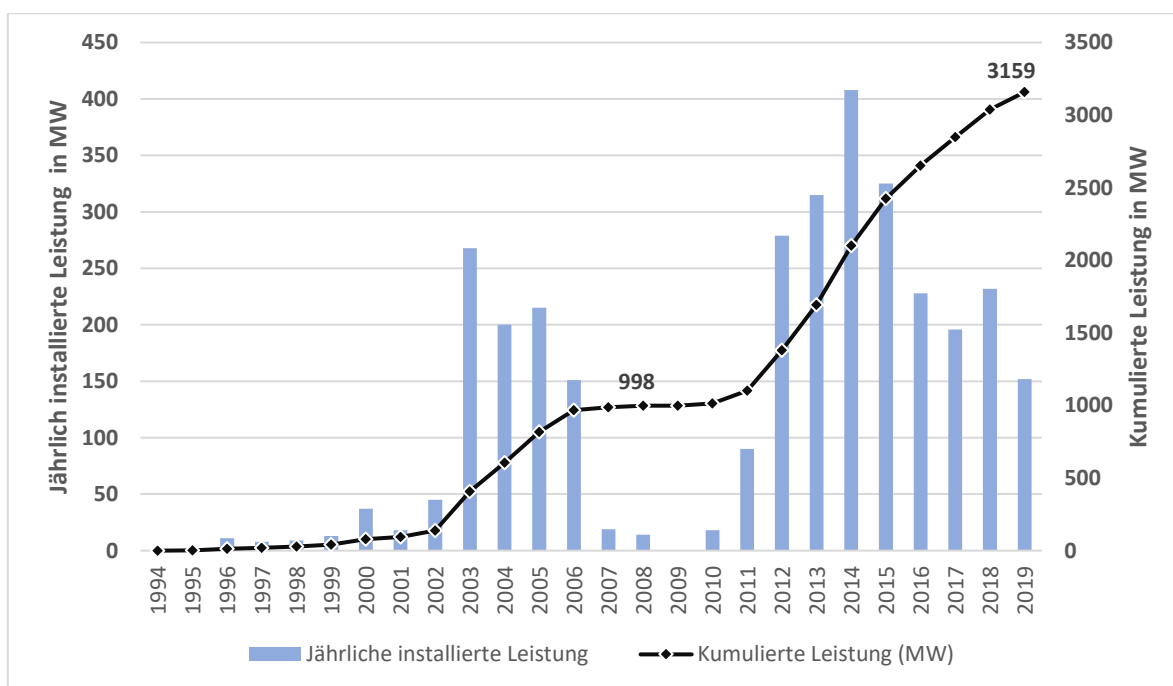


Abbildung 9: Jährlich in Österreich installierte Leistung und kumulierte Leistung von 1994 bis 2019 (Eigene Darstellung) (Biermayr et al., 2019, S. 209)

Der österreichische Windkraft-Anlagenbestand wird von 15 verschiedenen Herstellern vertreten. Abbildung 10 zeigt, welche Unternehmen die meisten Anteile am Bestand aufweisen.

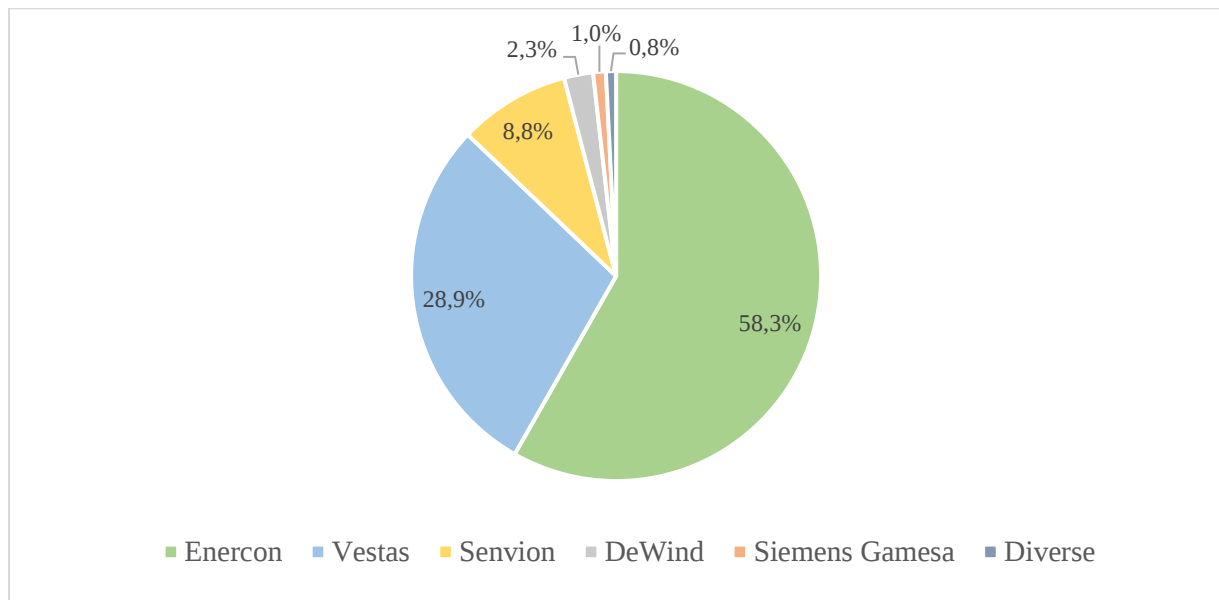


Abbildung 10: Marktanteile der Hersteller von Windkraftanlagen am österreichischen Bestand 2019 (Quelle: (Biermayr et al., 2019, S. 211))

Ende 2019 hatten 43,7% der WKA eine Größe über 3 MW, 34,6% hatten eine Größe zwischen 2-3 MW, 14,3% eine Größe zwischen 1-2 MW und 7,4% umfassten Anlagen mit einer Größe unter 1 MW (Biermayr et al., 2019, S. 212). Die durchschnittliche Anlagenleistung der im Jahr 2019 erbauten WKA wuchs auf 3,14 MW. Dieser Zubau hängt wiederum von der besten verfügbaren Technologie ab (Biermayr et al., 2019, S. 211). Gradmesser für die eingesetzte Technologie sind die elektrische Anlagenleistung, der Rotordurchmesser und die Nabenhöhe (Biermayr et al., 2019, S. 213). In Österreich wird ebenso das sogenannte Repowering durchgeführt. Hierbei werden alte WKA durch neue WKA in bestehenden Windkraftparks ersetzt (Scherhauser et al., 2020, S. 3).

In Österreich basieren etwa zwei Drittel des WKA-Bestands auf Anlagen ohne Getriebe, während ca. ein Drittel auf Anlagen mit Getriebe entfällt (Biermayr et al., 2019, S. 211). Dabei können Turbinen mit Permanentmagneten, bestehend aus Neodym-Eisen-Bor, versehen werden (Scherhauser et al., 2020, S. 6).

Materialzusammensetzung von Windkraftanlagen

Um die österreichische Situation bestmöglich abzudecken werden die Daten einer Vestas V112-3.45 MW (Razdan & Garrett, 2017) als auch einer Enercon E82 2,3MW (Zimmermann, 2013) herangezogen, da die beiden Hersteller die größte Marktrelevanz in Österreich haben (siehe Abbildung 10). WKA der Firma Enercon nutzen in Österreich kein Getriebe, während WKA der Firma Vestas ein Getriebe verwenden.

WKA der Firma Vestas bestehen aus ca. 25.000 Bauteilen, die sich in mehreren Hauptkomponenten einer WKA finden. Zu diesen Hauptkomponenten zählen das Fundament, der Turm, die Gondel, der Rotor, der Transformator und das elektronische System bzw. dessen Verkabelung (Razdan & Garrett, 2017, S. 96). Tabelle 11 gibt Aufschluss über die Materialzusammensetzung einer WKA der Firma Vestas. Das Fundament bilden massenreiche Komponenten bestehend aus Beton und Stahl, deren Menge durch die Nabenhöhe beeinflusst wird (Razdan & Garrett, 2017, S. 46). Die Nabenhöhe liegt bei der Vestas V112-3.45 MW bei 94 m. Der Rotordurchmesser ist mit 112 m gegeben (Razdan &

Garrett, 2017, S. 30). In Österreich lag der durchschnittliche Rotordurchmesser in den Jahren 2003 bis 2006 bei 72,15 m. Im Jahr 2019 lag der durchschnittliche Rotordurchmesser bereits bei 114 m (Biermayr et al., 2019, S. 213). Die Studie von Razdan & Garrett (2017) liefert somit aktuelle Daten in Bezug auf die MW-Leistung von Turbinen als auch in Hinblick auf Nabenhöhe und Rotordurchmesser. Nach Razdan und Garrett (2017, S. 48) kommen auf einen 100-MW-Windpark 0,05 t Magnete pro MW. Laut IG Windkraft trifft dies jedoch nicht auf Vestas-Anlagen zu, die in Österreich betrieben werden, da diese keine Permanentmagneten verwenden (Einsiedler, 2017, S. 28). Lediglich 9 der 1.340 WKA Österreichs verwenden NdFeB-Magnete. Laut Angerer et al. (2009, S. 239) teilt sich der spezifische Massenanteil innerhalb dieser Magnete zu 26,7% auf Neodym, zu 1% auf Bor und zu 72,3% auf Eisen auf. Da sich der Einsatz von NdFeB-Magnete auf 9 WKA beschränkt und der weitere Einsatz dieser Magnete in Österreich in Zukunft nicht beabsichtigt wird, werden diese Materialien in der Analyse nicht berücksichtigt.

In Bezug auf die Elektronik liegen in der Ökobilanz von Razdan & Garrett (2017) keine genaueren Daten zu den Subkomponenten und deren materieller Zusammensetzung vor, weshalb es in dieser Arbeit zu keiner weiteren quantitativen Aufschlüsselung der Materialien kommt.

Hinsichtlich des Stahlbedarfs dominiert in bei der Ökobilanz von Razdan & Garrett (2017) Baustahl mit einem Anteil von etwa 89%. In dieser Arbeit wird wie bei PVA der Baustahl EN24T (95,75% Eisen, 0,4% Kohlenstoff, 0,225% Silizium, 0,575% Mangan, 0,035% Phosphor, 0,04% Schwefel, 0,275% Molybdän, 1,2% Chrom und 1,5% Nickel) als verwendeter Baustahl für die Windkraft angenommen.

Die restlichen 11% verteilen sich auf hochlegierte Stähle. Für den hochlegierten Stahl wurde Typ 316 als typische Stahlsorte ausgewählt. Dieser Stahl setzt sich zu 67,8% aus Eisen, zu 17% aus Chrom, zu 12% aus Nickel, zu 2,5% aus Molybdän und zu 0,7% aus Mangan zusammen (Moss et al. 2011, S. 98). Bei der Materialzusammensetzung der Enercon E-82 von Zimmermann (2013) wird der Stahlbedarf nicht weiter aufgeschlüsselt. In dieser Arbeit wird daher die Annahme getroffen, dass sich die Anteile von legiertem und unlegiertem Stahl zu gleichen Teilen wie bei Razdan & Garrett (2017) aufteilen.

In der LCA der Firma Enercon für die WKA Enercon E82 wird die WKA und die Verknüpfung zur Energieabnahme dargestellt. Diese WKA besitzt einen 107 m hohen Betonturm. Der Rotordurchmesser beträgt 82 m. In der Enercon E-82 E2 ist wie bei allen Anlagen der Firma Enercon ein Synchrongenerator verbaut. Hierbei spielt insbesondere der Einsatz von Kupferwindungen eine bedeutende Rolle (Viebahn et al., 2014, S. 179).

In Bezug auf die Elektronik liegen in der Ökobilanz keine genaueren Daten zu den Subkomponenten und deren materieller Zusammensetzung vor, weshalb es in dieser Arbeit zu keiner weiteren Aufschlüsselung dieser Materialien kommt. Jedoch sei darauf hingewiesen, dass WKA in Bezug auf die Elektronik Rohstoffe wie etwa Kupfer Chrom, Mangan, Selen, Molybdän und Niob enthalten (Müller, 2018, S. 16).

Tabelle 11: Materialzusammensetzung und Komponenten einer Vestas V112-3.45 MW (Hischier et al., 2007; Razdan & Garrett, 2017)

Windkraftanlage		
Systemkomponenten	Hauptkomponenten	Materialien
Fundament		Beton, Schotter, Fe
Turm	Stahl-/Hybridturm	Stahl, Beton
Gondel	Gehäuse	Kunststoff
	Getriebe	Stahl, Gusseisen
	Generator	Stahl, Gusseisen, Cu
	Regeltechnik	-
Rotor	Rotorblätter	Kunststoff
	Rotornabe	Kunststoff
Transformator		Stahl, Cu
Elektronik & Verkabelung	Wechselrichter	Al, Cu, Fe, Pb, Ni, P, Ag, Zn, Sn, Pd, Mo, Au, Si, Cr, Stahl, Messing
	Verkabelung	Cu, Al

Tabelle 12: Materialzusammensetzung einer Vestas V112-3.45 MW basierend auf einem 100-MW-Windpark (in t/MW) (Razdan & Garrett, 2017)

Windkraftanlage (Vestas V112-3.45 MW)	
Hauptkomponenten	
Turbinen (inkl. Turm)	127,1E+0
Fundament	430,8E+0
Verkabelung	5,8E+0
Schalteneinrichtungen	8,0E-2
Transformator	5,8E-1
Materialien	
Stahl	116,9E+0
Niedrig legierter Stahl (EN24T)	103,9E+0
Eisen	99,5E+0
Silizium	2,3E-1
Mangan	6,0E-1
Molybdän	2,9E-1
Chrom	1,2E+0
Restliche Zusammensetzung	2,1E+0
Hoch legierter Stahl (18NiCrMo7)	13,0E+0
Eisen	8,8E+0
Chrom	2,2E+0
Nickel	1,5E+0
Molybdän	3,3E-1
Mangan	9,0E-2
Gusseisen	20,3E+0
Aluminium	3,0E+0
Kupfer	1,5E+0
Polymere	8,8E+0
Modifizierte organische Stoffe	6,0E-2
Keramik/Glas	7,5E+0
Beton	404,6E+0
SF6-Gas	2,8E-3
Elektronik/Elektrik	9,5E-1
Schmierstoffe	5,1E-1
Kühlmittel/andere Glykole	1,6E-1
Keine Angabe	5,0E-2

Tabelle 13: Materialzusammensetzung und Materialbedarf einer Enercon E82 2,3 MW (in t)
(Zimmermann, 2013, S. 52)

Windkraftanlage (Enercon E-82 E2)		
Hauptkomponenten		
Rotorblätter		30,2E+0
Gondel		136,7E+0
Turm		893,0E+0
Elektronik		38,5E+0
Fundament		1142E+0
Materialien		
Stahl		246,1E+0
Niedrig legierter Stahl		219,0E+0
Eisen		210,0E+0
Silizium		4,9E-1
Mangan		1,3E+0
Molybdän		6,0E-1
Chrom		2,6E+0
Restliche Zusammensetzung		4,3E+0
Hoch legierter Stahl		27,1E+0
Eisen		18,4E+0
Chrom		4,6E+0
Nickel		3,2E+0
Molybdän		6,8E-1
Mangan		1,9E-1
Gusseisen		73,0E+0
Kupfer		11,0E+0
Aluminium		1,28E+0
GFK		29,0E+0
Beton		1880,0E+0

Um die Materialmengen für WKA in Österreich zu bestimmen, wird davon ausgegangen, dass sich der Windkraft-Anlagenbestand zu 55% auf Enercon-Anlagen und zu 45% auf Vestas-Anlagen aufteilt. Somit ergeben sich die in Abbildung 11 ermittelten Materialmengen.

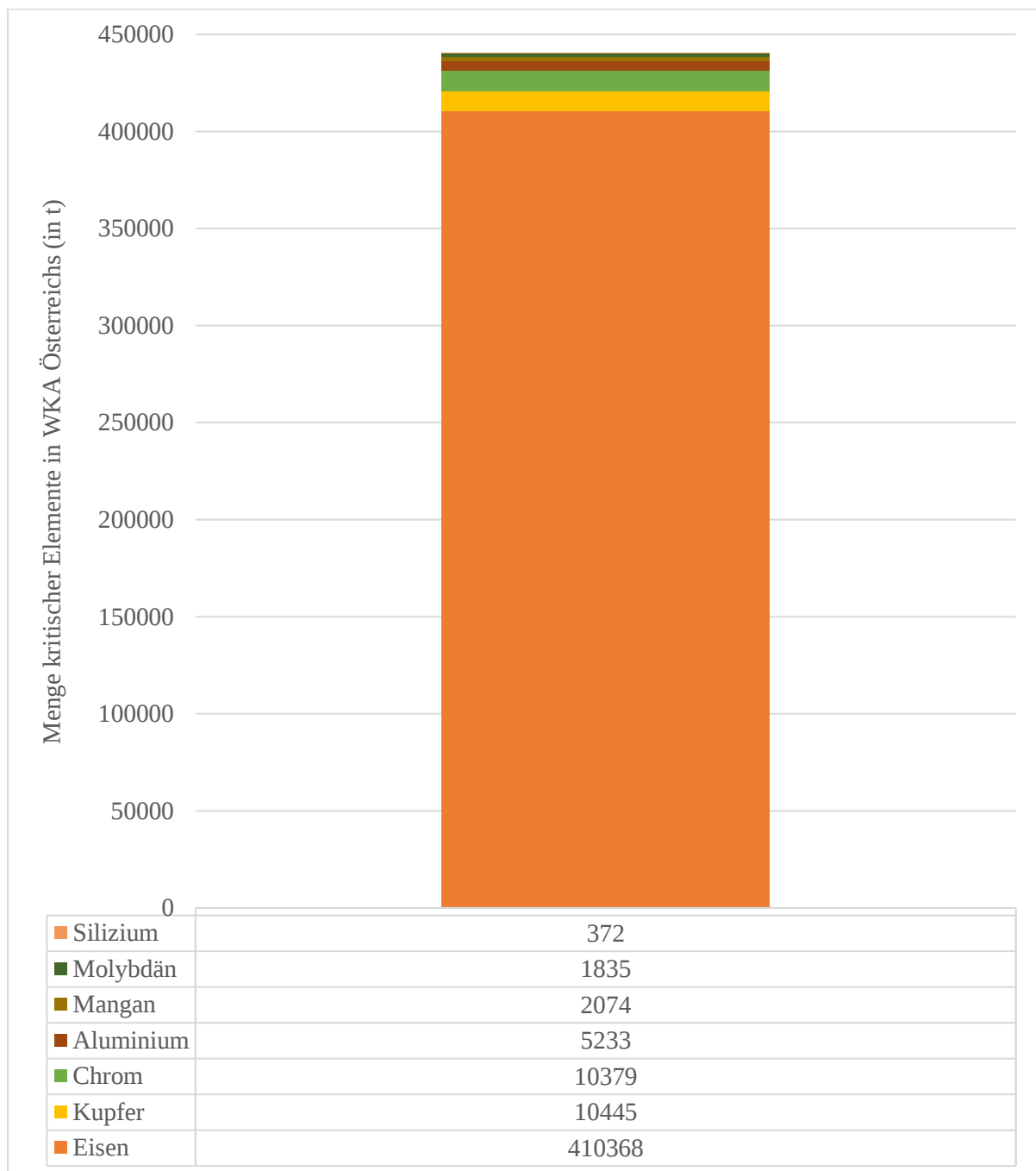


Abbildung 11: Ermittelte Materialmenge kritischer Elemente in WKA Österreichs (in t)

Abbildung 11 zeigt, dass Eisen, Kupfer, Chrom, Aluminium, Mangan, Molybdän und Silizium zu den kritischen Rohstoffen in den WKA Österreichs zählen. Dabei zählt Eisen (410.368 t) zum massenreichsten Metall, gefolgt von Kupfer (10.445 t) und Chrom (10.379 t).

1 H	Nennungen als kritisch 01-23-45-67-89-10																2 He						
3 Li	4 Be	Ordnungszahl→1 ← relevant für ← Symbol ← Elementname ⚙ Motoren/Generatoren ☀ Sonnenenergie ⚡ Batterien																5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo						

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

Abbildung 12: Kritische Elemente in Solarthermie-, Photovoltaik- und Windkraftanlagen Österreichs

2.5 Kumulierter Bedarf an kritischen Rostoffen für den zukünftigen Ausbau erneuerbarer Energien in Österreich bis 2040

In diesem Kapitel wird für die STA, PVA und WKA Österreichs der kumulierte Bedarf an kritischen Rohstoffen für das Jahr 2040 prognostiziert. Um Aussagen über den zukünftigen Ausbau von STA, PVA und WKA in Österreich zu machen, wird ausgehend vom Jahr 2019 die Bestandsentwicklung bis zum Jahr 2040 prognostiziert. Unter Zuhilfenahme der Prognose-Funktion von Microsoft Excel wird mithilfe der AAA-Version des ETS-Algorithmus der zukünftige Ausbau auf Grundlage vergangener Werte berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass der zukünftige Ausbau im Mittelwert der letzten 3 Jahre liegt. Da die Prognose-Funktion die zukünftige Bestandsentwicklung der erneuerbaren Energien innerhalb eines gewissen Konfidenzintervalls angibt, wird diesen Werten entweder ein niedriges, mittleres oder hohes Ausbauniveau zugeschrieben. Somit gleicht die untere Konfidenzgrenze einem niedrigen Ausbauniveau, der Schätzer einem mittleren Ausbauniveau und die obere Konfidenzgrenze einem hohen Ausbauniveau. Anschließend werden die Prognosen mit den Zielen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes der österreichischen Bundesregierung (Zubau von 11 TWh bei Photovoltaik, 10 TWh bei Windkraft, 5 TWh bei Wasserkraft und 1 TWh bei Biomasse) verglichen, wobei jene Ausbaupfade näher analysiert werden, die sich an den Zielen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes orientieren.

2.5.1 Entwicklung der Solarthermie und kumulierter Bedarf an kritischen Rohstoffen

Im Folgenden wird die Entwicklung der Solarthermie in Österreich bis zum Jahr 2040 prognostiziert.

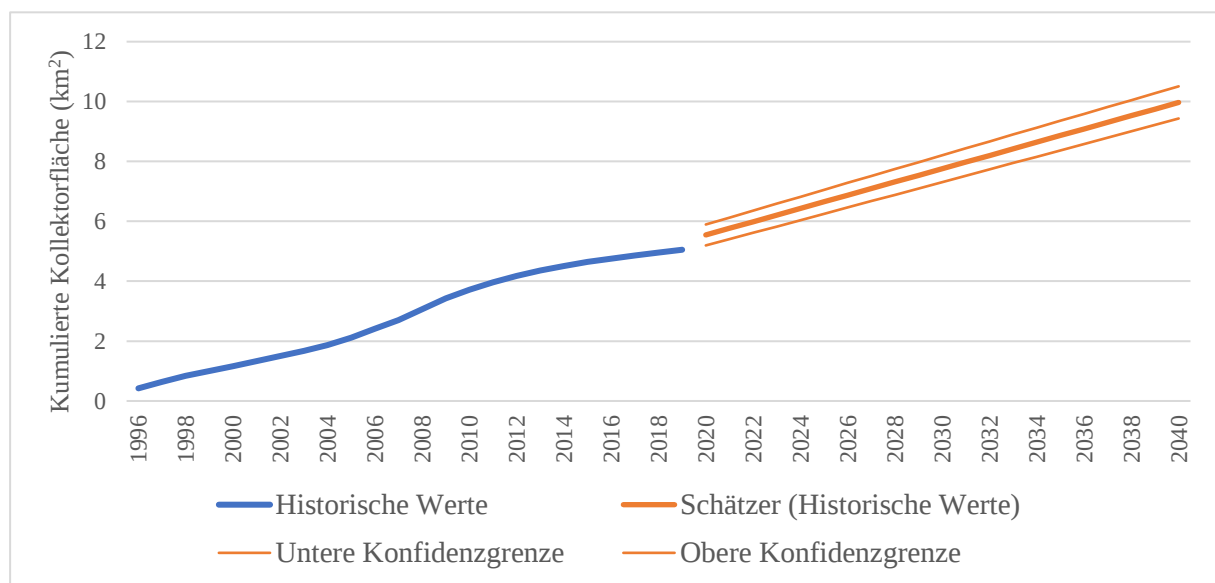


Abbildung 13: Entwicklung der installierten Leistung von STA bis zum Jahr 2040 basierend auf der Prognose-Funktion von Microsoft Excel

Abbildung 13 zeigt, dass die kumulierte Kollektorfläche bis zum Jahr 2040 auf ca. 10 km² steigen wird. Damit würde sich die Kollektorfläche bis zum Jahr 2040 etwa verdoppeln. Vergleicht man diese Prognosen mit den Zielen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes der österreichischen Bundesregierung (Zubau von 11 TWh bei Photovoltaik, 10 TWh bei Windkraft, 5 TWh bei Wasserkraft und 1 TWh bei Biomasse) zeigt sich, dass derzeit kein

Ausbau der Solarthermie in Österreich geplant ist. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass bis 2040 kein wesentlicher Ausbau der Solarthermie erfolgen wird. Somit ergeben sich keine weiteren Rohstoffbedarfe für die Solarthermie bis zum Jahr 2040.

2.5.2 Entwicklung der Photovoltaik und kumulierter Bedarf an kritischen Rohstoffen

Im Folgenden wird die Entwicklung der Photovoltaik in Österreich bis zum Jahr 2040 prognostiziert. Daraufhin erfolgt für die dreizehn in diesen Anlagen zum Einsatz kommenden und als kritisch eingestuften Elemente Aluminium, Silizium, Kupfer, Zinn, Silber, Blei, Eisen, Zink, Gold, Molybdän, Mangan, Palladium und Chrom eine Einschätzung des Rohstoffbedarfs bis zum Jahr 2040.

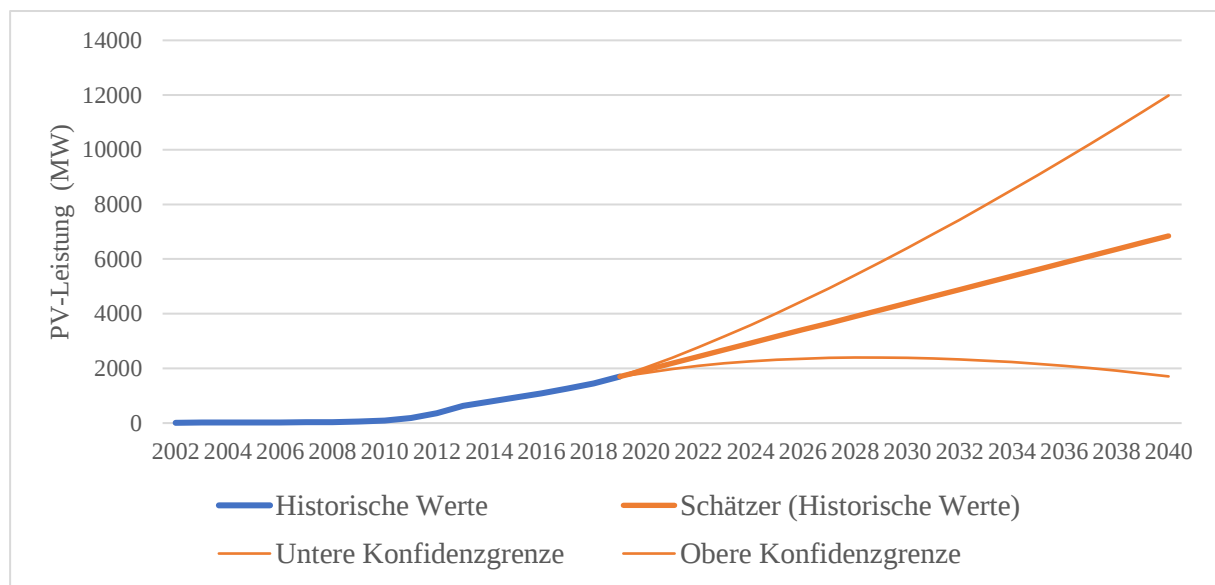


Abbildung 14: Entwicklung der installierten Leistung von PVA bis zum Jahr 2040 basierend auf der Prognose-Funktion von Microsoft Excel

Abbildung 14 zeigt, dass die kumulierte PV-Leistung für das Jahr 2040 innerhalb eines großen Konfidenzintervalls liegt. Somit ergeben sich folgende Rohstoffbedarfe bis zum Jahr 2040 (siehe Tabelle 14).

Vergleicht man diese Prognosen mit den Zielen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes der österreichischen Bundesregierung (Zubau von 11 TWh bei Photovoltaik, 10 TWh bei Windkraft, 5 TWh bei Wasserkraft und 1 TWh bei Biomasse) zeigt sich, dass das mittlere Szenario den politisch gewollten Ausbau unterschätzt und das Maximal-Szenario den Ausbau etwas überschätzt, wobei sich der politisch gewollte Ausbau eher an dem Maximal-Szenario orientiert. Somit kann der niedrige Ausbaupfad für Photovoltaik ausgeschlossen werden.

Tabelle 14: Kumulierter kritischer Rohstoffbedarf der in Österreich neu installierten PVA bis zum Jahr 2040 (in t)

Element	Ausbaupfad	PV-Leistung (in MW_p)	Rohstoffbedarf
Aluminium	Mittel	6.846	145.827 t
	Hoch	11.982	291.430 t
Eisen	Mittel	6.846	41.429 t
	Hoch	11.982	82.795 t
Silizium	Mittel	6.846	17.803 t
	Hoch	11.982	35.578 t
Kupfer	Mittel	6.846	6.738 t
	Hoch	11.982	13.468 t
Chrom	Mittel	6.846	519 t
	Hoch	11.982	1.036 t
Zinn	Mittel	6.846	424 t
	Hoch	11.982	848 t
Mangan	Mittel	6.846	248 t
	Hoch	11.982	496 t
Molybdän	Mittel	6.846	119 t
	Hoch	11.982	238 t
Silber	Mittel	6.846	99 t
	Hoch	11.982	199 t
Blei	Mittel	6.846	59 t
	Hoch	11.982	119 t
Zink	Mittel	6.846	9 t
	Hoch	11.982	19 t
Gold	Mittel	6.846	2 t
	Hoch	11.982	4 t
Palladium	Mittel	6.846	0,005 t
	Hoch	11.982	0,01 t

2.5.3 Entwicklung der Windkraft und kumulierter Bedarf an kritischen Rohstoffen

Im Folgenden wird die Entwicklung der Windkraft in Österreich bis zum Jahr 2040 prognostiziert. Daraufhin erfolgt für die sieben in diesen Anlagen zum Einsatz kommenden und als kritisch eingestuften Elemente Silizium, Molybdän, Mangan, Aluminium, Chrom, Kupfer und Eisen eine Einschätzung des Rohstoffbedarfs bis zum Jahr 2040.

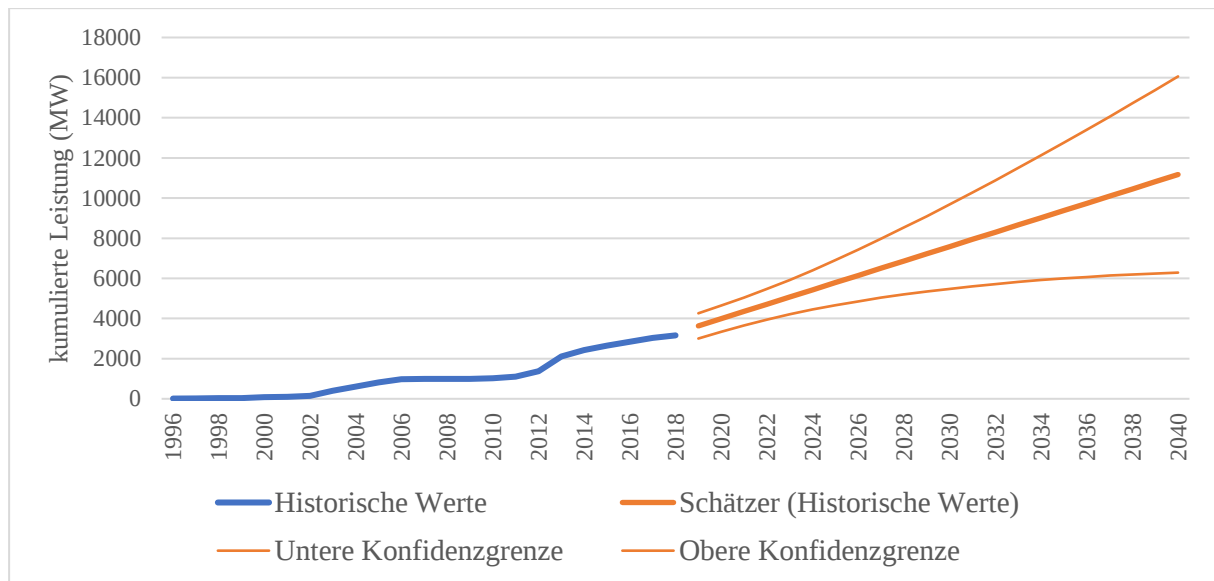


Abbildung 15: Entwicklung der installierten Leistung von WKA bis zum Jahr 2040 basierend auf der Prognose-Funktion von Microsoft Excel

Abbildung 15 zeigt, dass die kumulierte Windkraftleistung für das Jahr 2040 innerhalb eines großen Konfidenzintervalls liegt. Damit würde die Windkraftleistung bis zum Jahr 2040 doppelt bis fünfmal so groß werden.

Vergleicht man diese Prognosen mit den Zielen des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes der österreichischen Bundesregierung (Zubau von 11 TWh bei Photovoltaik, 10 TWh bei Windkraft, 5 TWh bei Wasserkraft und 1 TWh bei Biomasse) zeigt sich, dass das mittlere Szenario den politisch gewollten Ausbau unterschätzt und das Maximal-Szenario den Ausbau etwas überschätzt, wobei sich der politisch gewollte Ausbau eher an dem Maximal-Szenario orientiert. Somit kann der niedrige Ausbaupfad für Wasserkraft ausgeschlossen werden.

Ausgehend von dieser Prognose würde sich damit für das Jahr 2040 folgender Rohstoffbedarf für Silizium, Molybdän, Mangan, Aluminium, Chrom, Kupfer und Eisen ergeben (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: Kumulierter kritischer Rohstoffbedarf der in Österreich prognostizierten WKA bis zum Jahr 2040 (in t)

Element	Ausbaupfad	Leistung (in MW _p)	Rohstoffbedarf
Eisen	Mittel	11.173	1.040.595 t
	Hoch	16.059	1.675.107 t
Kupfer	Mittel	11.173	26.486
	Hoch	16.059	42.636
Chrom	Mittel	11.173	26.319 t
	Hoch	16.059	42.367 t
Aluminium	Mittel	11.173	13.270 t
	Hoch	16.059	21.361 t
Mangan	Mittel	11.173	5.259 t
	Hoch	16.059	8.466 t
Molybdän	Mittel	11.173	4.653 t
	Hoch	16.059	7.490 t
Silizium	Mittel	11.173	943 t
	Hoch	16.059	1.518 t

2.5.4 Zusammenfassung

Im Kapitel 2.5 wurde für STA, PVA und WKA Österreichs der kumulierte Bedarf an kritischen Rohstoffen im Rahmen der betrachteten Ausbaupfade bis zum Jahr 2040 abgeschätzt.

Für STA wurden Aluminium, Chrom, Kupfer und Eisen, für PVA Aluminium, Eisen, Silizium, Kupfer, Chrom, Zinn, Mangan, Molybdän, Silber, Blei, Zink, Gold und Palladium und für WKA Silizium, Molybdän, Mangan, Aluminium, Chrom, Kupfer und Eisen als potenziell kritische Rohstoffe identifiziert. Es sei darauf hingewiesen, dass bei allen Berechnungen für den zukünftigen Rohstoffbedarf nur jene Technologien berücksichtigt wurden, die im Kapitel 2.4 angenommen und näher beschrieben wurden. Sollten andere als die in Kapitel 2.4 angenommenen Technologien in Zukunft verstärkt Einsatz finden, wären wesentliche Verschiebung hinsichtlich des Rohstoffbedarfs denkbar.

Zusammenfassend ergibt sich für den untersuchten Zeitraum (2020-2040) der in Tabelle 17 dargestellte Rohstoffbedarf für die einzelnen Elemente.

Tabelle 16: Kumulierter kritischer Rohstoffbedarf der in Österreich neu installierten STA, PVA und WKA bis zum Jahr 2040 (in t)

Element	Ausbaupfad	Rohstoffbedarf
Eisen	Mittel	1.082.024
	Hoch	1.757.902
Aluminium	Mittel	159.097 t
	Hoch	312.790 t
Kupfer	Mittel	33.224 t
	Hoch	56.104 t
Chrom	Mittel	26.838 t
	Hoch	43.403 t
Silizium	Mittel	18.746 t
	Hoch	37.096 t
Mangan	Mittel	5.507 t
	Hoch	8.962 t
Molybdän	Mittel	4.772 t
	Hoch	7.728 t
Zinn	Mittel	424 t
	Hoch	848 t
Silber	Mittel	99 t
	Hoch	199 t
Blei	Mittel	59 t
	Hoch	119 t
Zink	Mittel	9 t
	Hoch	19 t
Gold	Mittel	2 t
	Hoch	4 t
Palladium	Mittel	0,005 t
	Hoch	0,01 t

3. Detailanalyse der identifizierten kritischen Metalle

In diesem Kapitel werden die identifizierten kritischen Metalle näher analysiert. Dabei wird auf ihre Eigenschaften, ihre Vorkommen und die Versorgungssituation in Österreich eingegangen, wobei der Materialverbrauch in den PVA, STA und WKA Österreichs für den Zeitraum 2020-2040 der globalen Jahresproduktion gegenübergestellt wird. Umweltfolgen, die sich vor, während und nach dem Rohstoffabbau ergeben, werden in diesem Kapitel nicht näher betrachtet. Jedoch sei darauf hingewiesen, dass Kapitel 4 - Handlungsmöglichkeiten für metallische Rohstoffe – einen nachhaltigen Umgang mit kritischen Rohstoffen beschreibt. Durch die Betrachtung der globalen Produktionsmengen kann die Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe eingeschätzt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Bevölkerungsanteil Österreichs an der Weltbevölkerung etwas über 0,1% liegt. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass der Anteil Österreichs an den betrachteten kritischen Rohstoffen bei 0,1% liegt. Die betrachteten kritischen Rohstoffe finden nicht nur in erneuerbaren Energietechnologien Anwendung, sondern sind auch in anderen Technologien zu finden. Daher muss berücksichtigt werden, dass es auch andere konkurrierende Nachfragen nach diesen kritischen Rohstoffen gibt.

3.1 Die Geologie und Technologie der Metalle

Metalle zeichnen sich durch chemische und physikalische Eigenschaften wie z.B. eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, Verformbarkeit und die Fähigkeit, Legierungen zu bilden, aus. Sie werden für eine Vielzahl von Anwendungen verwendet und einige dieser Metalle, wie etwa Eisen, Aluminium und Kupfer, werden in großen Mengen produziert. Andere Metalle, wie etwa Platin, Indium und Kobalt, finden in einer geringeren oder spezielleren Anzahl von Anwendungen Verwendung. Diese werden in viel kleineren Mengen produziert, die von Dutzenden bis Hunderten oder Tausenden von t pro Jahr reichen können. Die Häufigkeit der einzelnen Metalle in der Erdkruste variiert stark (siehe Abbildung 16) und beeinflusst die Kosten, die mit der Lokalisierung, dem Abbau und der Aufbereitung der Metalle für die Verwendung verbunden sind (Gunn, 2014, S. 2).

Einige der wichtigsten Industriemetalle, wie Eisen, Aluminium und Kalzium, kommen in der Erdkruste ähnlich häufig vor wie die wichtigsten gesteinsbildenden Elemente, wie z.B. Sauerstoff, Silizium und Kalzium, und sind um mehrere Größenordnungen häufiger als viele der weit verbreiteten Basismetalle wie Kupfer, Blei und Zink anzutreffen. Viele andere Metalle, wie z. B. die Edelmetalle Gold und Platin, sind deutlich seltener. Die Häufigkeit dieser Metalle in der Erdkruste ist jedoch nur ein Faktor, der die Produktionskosten beeinflusst. Einige Metalle, wie z.B. Magnesium, Aluminium und Titan kommen in Verbindungen vor, die einen hohen Energieaufwand benötigen, um sie aus ihren Erzen zu gewinnen, weshalb diese Metalle relativ teuer sind (Gunn, 2014, S. 2). So wurde für eine Tonne Magnesium im Jahr 2019 durchschnittlich 2.320 US-Dollar gezahlt. (Statista, 2021). Hinzu kommt, dass die lokalisierten Vorkommen von Metallen, die wirtschaftlich genutzt werden können, aus speziellen geologischen Prozessen resultieren. Aus diesem Grund ist die Verteilung der wirtschaftlich abbaubaren Lagerstätten stark gestreut, wodurch es einige Regionen gibt, die reich an Metallen und andere Regionen, die weitgehend frei davon sind. Weiters ist unser Wissen über die Prozesse die zur Konzentration bestimmter Metalle in der Erdkruste führen sehr unterschiedlich. Für Metalle, die in großen Mengen verwendet werden, wie z.B. Kupfer und Zink, gibt es einigermaßen gute Methoden, um festzustellen, wo neue

Lagerstätten zu finden sind. Für viele der selteneren Metalle, besonders jene, die erst seit relativ kurzer Zeit in großem Umfang genutzt werden, sind unsere Vorstellungen über ihre Vorkommen und Konzentrationen sehr begrenzt (Gunn, 2014, S. 2).

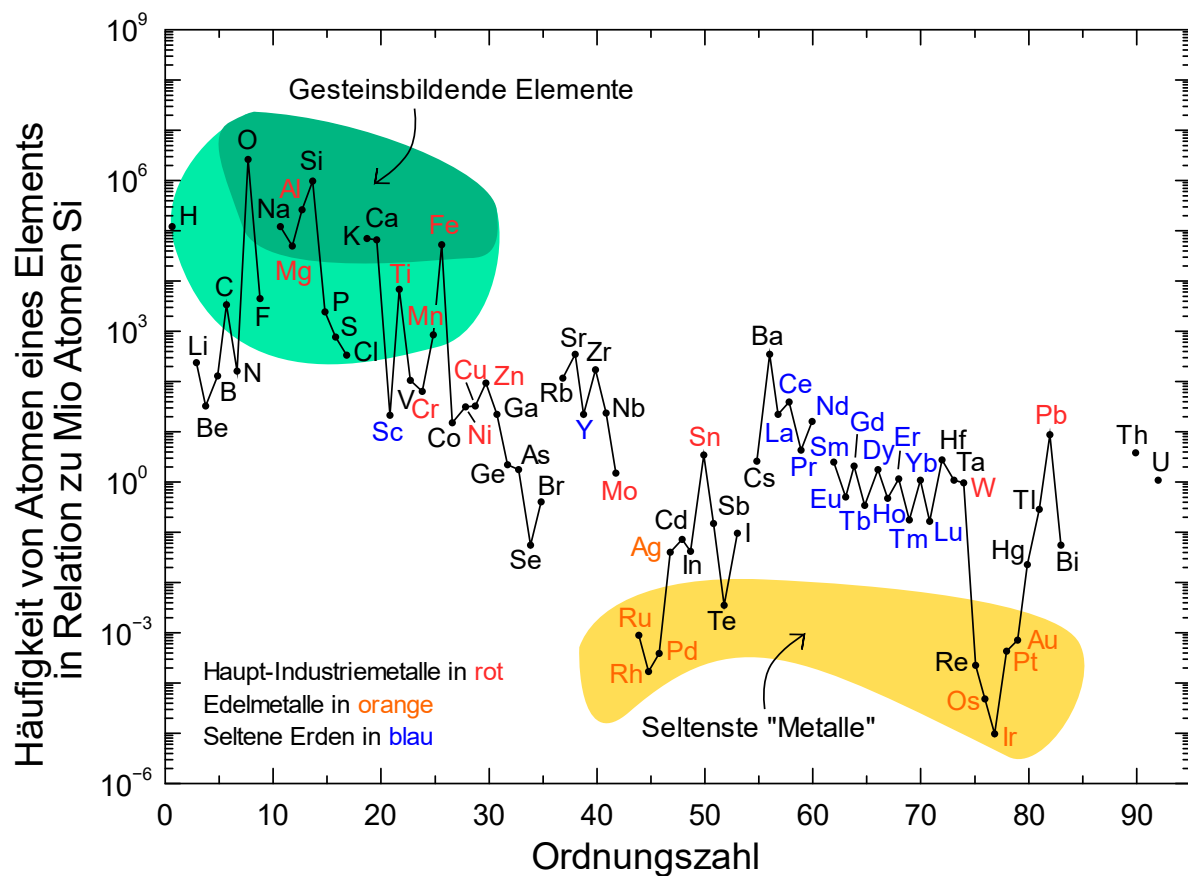


Abbildung 16: Abundanz (Atomanteil) der chemischen Elemente in der oberen kontinentalen Erdkruste als Funktion der Ordnungszahl. Viele der Elemente werden in (sich teilweise überschneidende) Kategorien eingeteilt: (1) gesteinsbildende Elemente (Hauptelemente im grünen Feld und Nebenelemente im hellgrünen Feld); (2) Seltene Erden (Lanthanoide, La-Lu und Y; blau markiert); (3) Haupt- Industriemetalle (weltweite Produktion $\geq 3 \times 10^7$ kg/Jahr; rot markiert); (4) Edelmetalle (orange); und (5) die neun seltensten "Metalle" - die sechs Platingruppenelemente plus Au, Re und Te (ein Metalloid) (Haxel et al., 2002, S. 3)

Neben den geologischen Prozessen, die die physische Verfügbarkeit eines Metalls bestimmen, gibt es eine Vielzahl anderer Faktoren, die den Zugang zu den Ressourcen im Boden beeinflussen. So können billige Arbeitskräfte oder billiger Strom einem bestimmten Land oder einer Region einen Wettbewerbsvorteil verschaffen, während andererseits staatliche Regulierungen, steuerliche und administrative Auflagen oder soziale und kulturelle Zwänge den Zugang zu potenziell wertvollen Lagerstätten beschränken oder verhindern können. Die Zeitspanne von der Entdeckung eines Mineralvorkommens bis zur Minenproduktion ist im Allgemeinen sehr lang. Es dauert in der Regel mehr als zehn Jahre, um die Mineralressourcen im Boden zu bewerten, die Mittel für den Bau einer Mine aufzubringen, die notwendigen behördlichen Genehmigungen zu erhalten und das Vertrauen und die Kooperation der lokalen Gemeinden zu sichern. Sobald diese Voraussetzungen erfüllt sind und günstige wirtschaftliche Bedingungen herrschen, können die Mine und die unterstützende Infrastruktur gebaut und die Mineralienförderung begonnen werden (Gunn, 2014, S. 2–3).

Im Laufe der Jahre haben Geologen, Bergbauingenieure und andere in diesem Feld tätige Personen verschiedene Begriffe verwendet, um mineralische Ressourcen zu beschreiben und zu klassifizieren. Einige dieser Begriffe haben eine breite Verwendung und Akzeptanz gefunden, obwohl sie nicht immer mit der gleichen Bedeutung verwendet werden. Ein anerkanntes Klassifizierungssystem ist jenes des United States Geological Surveys (USGS), welches in dieser Arbeit verwendet wird.

Als Ressourcen werden laut USGS (2020, S. 195) alle natürlichen Vorkommen von festen, flüssigen oder gasförmigen Materialien bezeichnet, die in oder auf der Erdkruste in einer Menge oder Form vorliegen, so dass die wirtschaftliche Gewinnung dieser Rohstoffe derzeit oder in Zukunft möglich ist.

Reserven sind jener Teil der Reservenbasis, der zum Zeitpunkt der Bestimmung wirtschaftlich abgebaut oder produziert werden könnte. Das muss jedoch nicht bedeuten, dass Fördereinrichtungen vorhanden und betriebsbereit sind. Unter Reserven werden förderbare Materialien verstanden, weshalb Begriffe wie „förderbare Reserven“ und „abbaubare Reserven“ redundant sind (USGS, 2020, S. 195)

Das sogenannte McKelvey-Diagramm gibt einen Überblick über die Klassifizierung von Ressourcen und Reserven (siehe Abbildung 17).

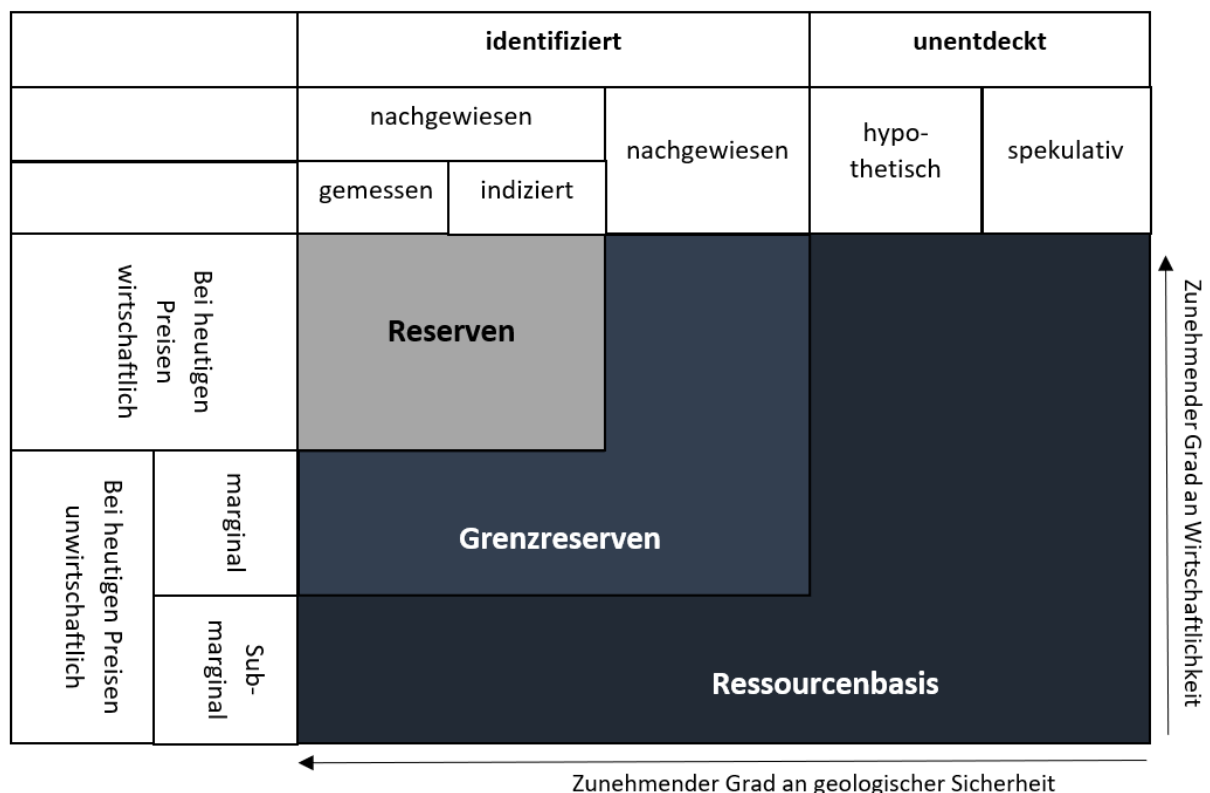


Abbildung 17: McKelvey Diagramm (Eigene Darstellung) (USGS, 2020, S. 197)

3.2 Aluminium

Aluminium (Al) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 13 und zählt zu den Metallen. Aluminium besitzt eine relative Atommasse von 26,98 u und seine Dichte beträgt $2,7 \text{ g/cm}^3$. Der Schmelzpunkt von Aluminium liegt bei $660,2 \text{ °C}$ und der Siedepunkt bei 2470 °C .

Aluminium wird in fast allen wirtschaftlichen Bereichen verwendet. Die Anwendungen erstrecken sich von Architektur über Verkehr, Maschinenbau, Elektrotechnik und Verpackung bis hin zu Sport und Freizeit, Unterhaltung und Kommunikation. Aluminium steht dabei in direktem Wettbewerb mit anderen Werkstoffen, weshalb es sich gegenüber den Herausforderungen der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit behaupten muss. Aluminium zeichnet sich durch ein geringes spezifisches Gewicht aus, weshalb es sich für den energiesparenden Leichtbau (Automobilbau, Flugzeugbau etc.) eignet (Hornbogen et al., 2019, S. 2). Zudem dient Aluminium als ausgezeichneter Reflektor für Spiegel und wird in Form von dünnen Folien als Verpackungsmaterial verwendet (Neukirchen, 2016, S. 129). Aluminium wird bei STA für den Rahmen in Flachkollektoren eingesetzt. In PVA wird Aluminium in der PV-Zelle, im Rahmen als auch im Wechselrichter verbaut. In WKA findet Aluminium in den Turbinen als auch in Standortkabeln Verwendung.

Aluminium ist das dritthäufigste Element in der Erdkruste und macht etwa 8% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3). Tabelle 18 gibt einen Überblick über die elementare Zusammensetzung der Erdkruste. Aufgrund seiner chemischen Eigenschaft mit Nichtmetallen, allen voran Sauerstoff, zu reagieren, kommt es ausschließlich in Verbindung mit anderen Elementen vor. So findet sich Aluminium in Gestein, Ton, Boden und Vegetation in Verbindung mit Sauerstoff und anderen Elementen (Budd, 1999, S. 3). Das wichtigste Aluminiumerz ist Bauxit (Neukirchen, 2016, S. 129), welches nach dem Ort Le Baux in Südfrankreich benannt wurde, wo es 1821 entdeckt wurde (Ostermann, 2014, S. 741).

Tabelle 17: Elementare Zusammensetzung der Erdkruste (Budd, 1999, S. 3)

Element	Anteil (Gew.-%)	Element	Anteil (Gew.-%)
Sauerstoff	46,46	Titan	0,62
Silizium	27,61	Wasserstoff	0,14
Aluminium	8,07	Phosphor	0,12
Eisen	5,06	Kohlenstoff	0,009
Kalzium	3,64	Mangan	0,009
Natrium	2,83	Schwefel	0,006
Kalium	2,58	Zink	0,004
Magnesium	2,07	Kupfer	0,0001

3.2.1 Vorkommen

Aluminium steht im weltweiten Verbrauch nach Eisen an zweiter Stelle (Neukirchen, 2016, S. 130). Laut USGS (2021, S. 21) betrug die weltweite Jahresproduktion von Aluminium im Jahr 2020 65,2 Millionen (Mio.) t. Zum größten Produzenten von Aluminium zählt China (37 Mio. t), gefolgt von Russland und Indien (beide mit jeweils 3,6 Mio. t), Kanada (3,1 Mio. t), Vereinigte Arabische Emirate (VAE) (2,6 Mio. t), Australien (1,6 Mio. t), Bahrain (1,5 Mio. t), Norwegen (1,4 Mio. t), USA (1 Mio. t) und Island (0,84 Mio. t) (siehe Abbildung 18).

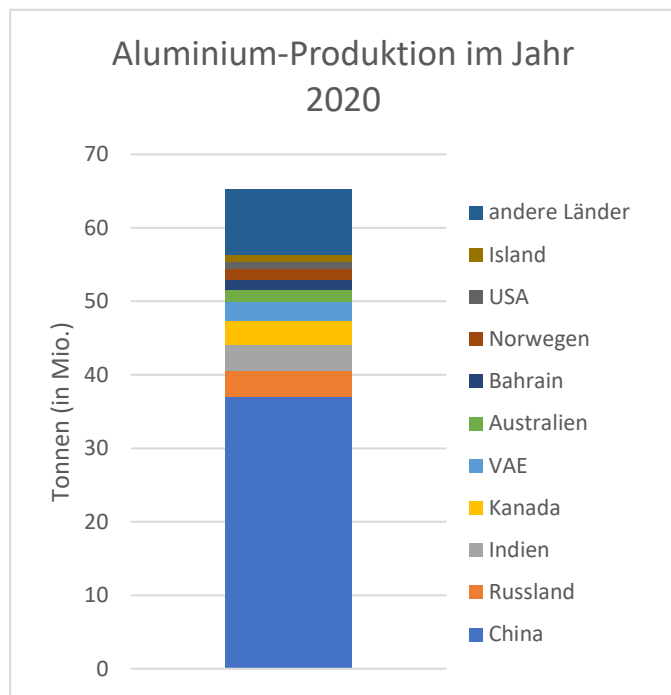


Abbildung 18: Länder mit der größten Aluminium-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 31)

Die größten Reserven an Bauxit hat Guinea mit 7,4 Mrd. t, gefolgt von Australien (5,1 Mrd. t), Vietnam (3,7 Mrd. t), Brasilien (2,7 Mrd. t), Jamaika (2 Mrd. t), Indonesien (1,2 Mrd. t), China (1 Mrd. t), Indien (0,66 Mrd. t), Russland (0,5 Mrd. t), Saudi-Arabien (0,19 Mrd. t), Malaysia (0,17 Mrd. t) und Kasachstan (0,16 Millionen t) (USGS, 2021, S. 31) (siehe Abbildung 19).

Die globalen Ressourcen für Bauxit (Aluminiumerz) werden auf 55 bis 75 Mrd. t geschätzt, weshalb das USGS (2021, S. 31) die Nachfrage nach diesem Metall für die Zukunft als gesichert einstuft.

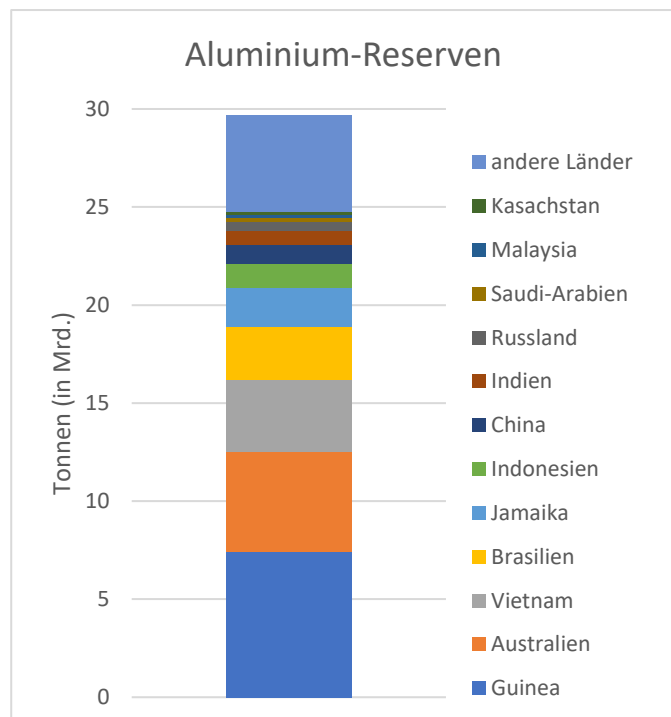


Abbildung 19: Länder mit den größten Bauxit-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 31)

3.2.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Aluminium in den PVA und WKA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energien im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 21.513 t und ein maximaler Bedarf von 334.296 t Aluminium. Dem steht wie in Kapitel 3.2.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von 65,2 Mio. t Aluminium im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 1,3 Mrd. t Aluminium. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Aluminium in Österreich durch den Ausbau von PVA und WKA mindestens etwa 0,012% und maximal etwa 0,024% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Aluminium oder etwa 0,24% bis etwa 0,48% einer Weltjahresproduktion.

Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums und der erwartbaren erheblichen Konkurrenzsituation durch die Nachfrage für andere Technologien ist der Aluminiumbedarf möglicherweise als kritisch einzuschätzen. Dies hängt unter anderem mit der zunehmenden Nachfrage nach Leichtbaulösungen zusammen, um so den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen in diesen Bereichen zu reduzieren (Mayer-Jauck, 2020, S. 14).

3.3 Kupfer

Kupfer (Cu) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 29 und zählt zu den Übergangsmetallen. Kupfer besitzt eine relative Atommasse von 63,54 u und seine Dichte beträgt 8,9 g/cm³. Der Schmelzpunkt von Kupfer liegt bei 1084,62 °C und der Siedepunkt bei 2595 °C.

Kupfer kommt mit einem Anteil von etwa 0,0001% relativ häufig in der Erdkruste vor (siehe Tabelle 18) (Budd, 1999, S. 3). Kupfer zählt zu den ältesten Metallen, die von Menschen genutzt wurden. Kupfer gehört zu den Metallen, welches in der Natur in Reinform, insbesondere gediegen Kupfer, zu finden ist (Neukirchen, 2016, S. 3). Unter gediegen wird das Vorkommen von reinen chemischen Elementen in der Natur verstanden. In seiner reinen Form ist Kupfer ein hellrotes, hartes, gut schmiedbares und schweres Metall. Kupfer ist ein edles Metall, weshalb es nicht oxidiert. Durch Kupfer ergeben sich vielfältige Herstellungsmöglichkeiten. Dazu zählen Bleche, Folien und Drähte. Kupfer zeichnet sich durch eine hohe elektrische Leitfähigkeit und eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus. Zudem kann Kupfer mit vielen weiteren Metallen legiert werden, wodurch Produkte mit spezifischen Eigenschaften hergestellt werden können (Angerer et al., 2009, S. 243). Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften wird Kupfer in einer Vielzahl von Anwendungen verwendet. Hierzu zählen Anwendungen im Hochbau (43%), für elektrische Produkte (21%), Transporteinrichtungen (19%), allgemeine Produkte (10%) und Industriemaschinen bzw. Industrieanlagen (7%) (USGS, 2021, S. 52). Kupfer wird bei STA im Absorber der Flachkollektoren eingesetzt. In PVA wird Kupfer in der PV-Zelle, in der Verkabelung als auch in den elektronischen Komponenten des Wechselrichters verbaut. In WKA findet Kupfer im Generator, dem Transformator als auch in der Verkabelung Verwendung.

3.3.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 53) betrug die weltweite Jahresproduktion von Kupfer im Jahr 2020 45 Mio. t, wobei 20 Mio. t aus der Minenproduktion und 25 Mio. t aus der Raffinerieproduktion stammten. Zum größten Produzenten von Kupfer zählt China (11,5 Mio. t), gefolgt von Chile (8,1 Mio. t), Peru (2,53 Mio. t), Demokratische Republik Kongo (DR Kongo) (2,4 Mio. t), USA (2,11 Mio. t), Russland (1,91 Mio. t), Japan (1,6 Mio. t), Australien (1,25 Mio. t), Sambia (1,19 Mio. t), Mexiko (1,16 Mio. t), Kasachstan (1,12 Mio. t), Polen (0,95 Mio. t), Kanada (0,86 Mio. t), Südkorea (0,68 Mio. t) und Deutschland (0,67 Mio. t) (siehe Abbildung 20).

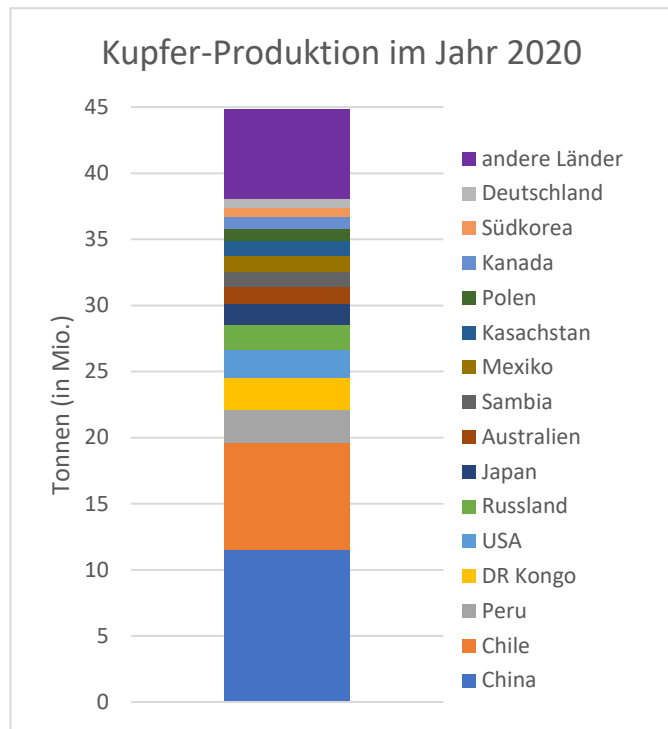


Abbildung 20: Länder mit der größten Kupfer-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 53)

Im Jahr 2020 betrugen die weltweiten Reserven etwa 870 Mio. t. Den größten Teil dieser Reserven hält Chile (200 Mio. t), gefolgt von Peru (92 Mio. t), Australien (88 Mio. t), Russland (61 Mio. t), Mexiko (53 Mio. t), USA (48 Mio. t), Polen (32 Mio. t), China (26 Mio. t), Sambia (21 Mio. t), Kasachstan (20 Mio. t), DR Kongo (19 Mio. t), Kanada (9 Mio. t) und Deutschland (2 Mio. t) (USGS, 2021, S. 53) (siehe Abbildung 21).

Die im Jahr 2015 global identifizierten Ressourcen für Kupfer wurden auf 2,1 Mrd. t geschätzt. Die unentdeckten Ressourcen werden näherungsweise auf 3,5 Mrd. t beziffert (USGS, 2021, S. 53).

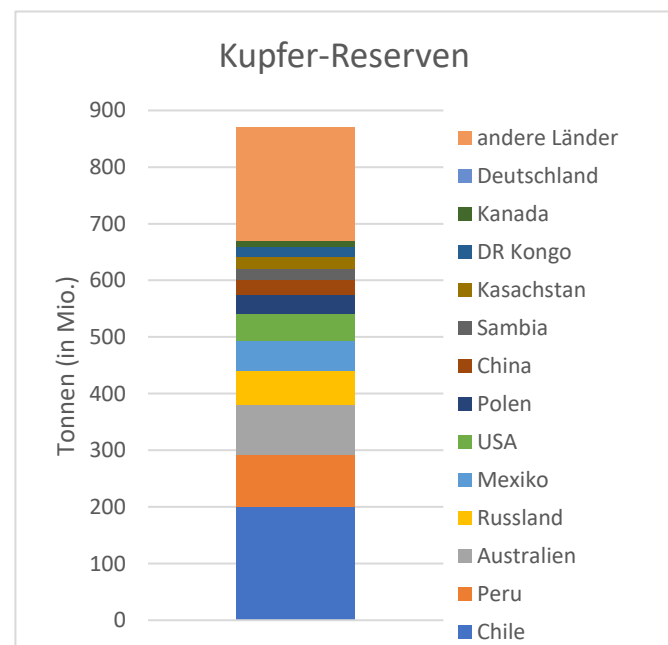


Abbildung 21: Länder mit den größten Kupfer-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 53)

3.3.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Kupfer in den PVA und WKA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energien im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 33.224 t und ein maximaler Bedarf von 56.104 t Kupfer. Dem steht wie in Kapitel 3.3.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von 45 Mio. t Kupfer im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 900 Mio. t Kupfer. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Kupfer in Österreich durch den Ausbau von PVA und WKA mindestens etwa 0,004% und maximal etwa 0,006% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Kupfer oder etwa 0,07% bis etwa 0,12% einer Weltjahresproduktion.

Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums und der erwartbaren erheblichen Konkurrenzsituation durch die Nachfrage für andere Technologien ist der Kupferbedarf möglicherweise als kritisch einzuschätzen.

3.4 Eisen

Eisen (Fe) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 26 und zählt zu den Übergangsmetallen. Eisen besitzt eine relative Atommasse von 55,84 u und seine Dichte beträgt 7,8 g/cm³. Der Schmelzpunkt von Eisen liegt bei 1538 °C und der Siedepunkt bei 3000 °C. Eisen wird in PVA im BOS verbaut. In WKA wird Eisen im Fundament und dem elektronischen System verbaut. In STA wird kein Eisen verwendet.

Eisen ist nach Sauerstoff, Silizium und Aluminium das vierthäufigste Element in der Erdkruste und macht etwa 5,06% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3).

3.4.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 89) betrug die weltweite Jahresproduktion von elementarem Eisen im Jahr 2020 1,5 Mrd. t. Zum größten Produzenten von Eisen zählt Australien (560 Mio. t), gefolgt von Brasilien (252 Mio. t), China (210 Mio. t), Indien (140 Mio. t), Russland (63 Mio. t), Südafrika (40 Mio. t), Ukraine (39 Mio. t), Kanada (34 Mio. t), USA (24 Mio. t), Schweden (22 Mio. t), Iran (21 Mio. t), Peru (10 Mio. t), Türkei (8,9 Mio. t), Chile (8 Mio. t) und Kasachstan (5,9 Mio. t) (siehe Abbildung 22).

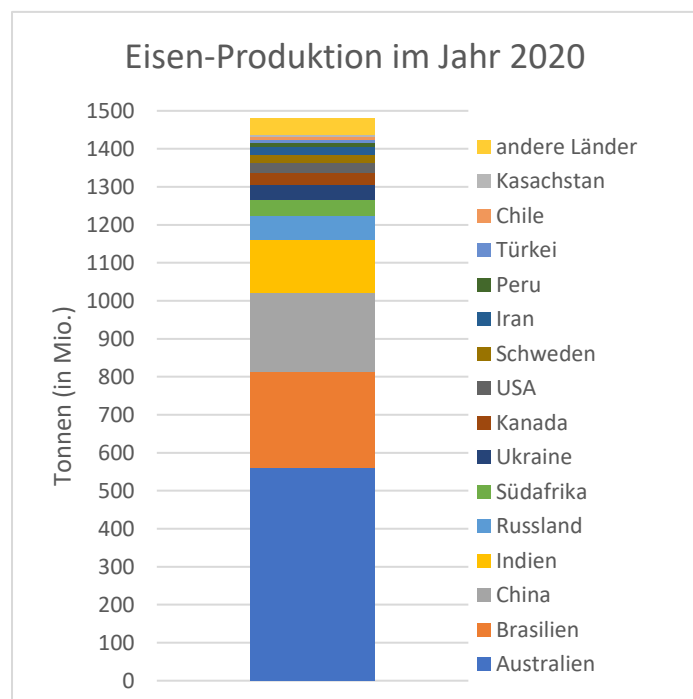


Abbildung 22: Länder mit der größten Eisen-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 89)

Die weltweiten Reserven werden mit 84 Mrd. t betitelt. Australien (24 Mrd. t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von Brasilien (15 Mrd. t), Russland (14 Mrd. t), China (6,9 Mrd. t), Indien (3,4 Mrd. t), Kanada und Ukraine (beide mit jeweils 2,3 Mrd. t), Iran und Peru (beide mit jeweils 1,5 Mrd. t), USA (1 Mrd. t), Kasachstan (0,9 Mrd. t), Südafrika (0,64 Mrd. t) und Schweden (0,6 Mrd. t). Daten zu den Reserven von Chile und Türkei sind nicht vorhanden (siehe Abbildung 23) (USGS, 2021, S. 89).

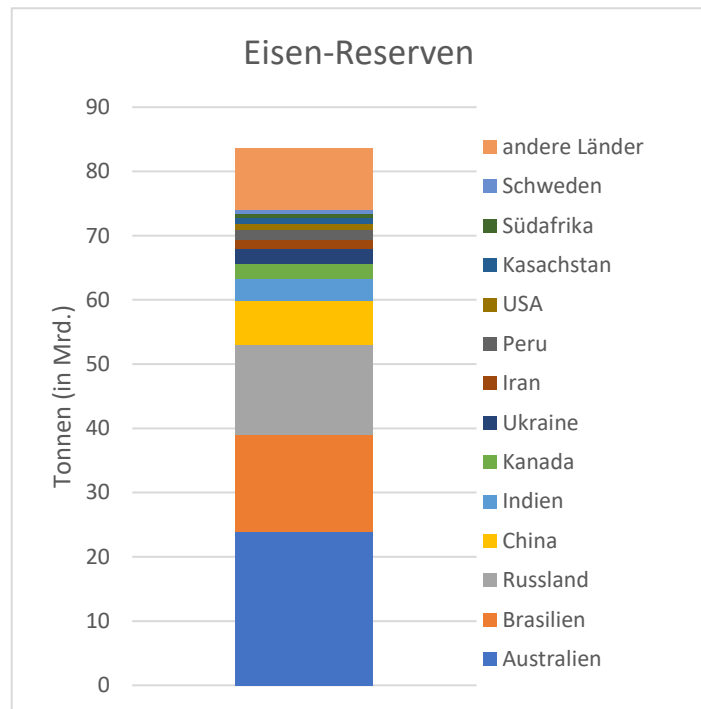


Abbildung 23: Länder mit den größten Eisen-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 89)

3.4.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Eisen in den PVA und WKA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energien im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 1.082.024 t und ein maximaler Bedarf von 1.757.902 t Eisen. Dem steht wie in Kapitel 3.4.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von etwa 1,5 Mrd. t Eisen im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 30 Mrd. t Eisen. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Eisen in Österreich durch den Ausbau von PVA und WKA mindestens etwa 0,004% und maximal etwa 0,006% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Eisen oder etwa 0,07% bis etwa 0,1% einer Weltjahresproduktion.

Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums und der erwartbaren erheblichen Konkurrenzsituation durch die Nachfrage für andere Technologien ist der Eisenbedarf möglicherweise als kritisch einzuschätzen.

3.5 Silizium

Silizium (Si) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 14 und zählt zu den Halbmetallen, weshalb es Eigenschaften von Metallen und Nichtmetallen aufweist. Silizium hat eine relative Atommasse von 28,08 u und eine Dichte von 2,3 g/cm³. Der Schmelzpunkt von Silizium liegt bei 1410 °C und der Siedepunkt bei 3260 °C. Silizium ist das

zweithäufigste Element in der Erdkruste und macht etwa 27,61% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3).

Reines Silizium fungiert als Halbleiter, weshalb sein elektrischer Widerstand innerhalb der Grenzen eines schlechten Leiters und eines Isolators liegt. Durch Dotierung des reinen Siliziums lässt sich dessen Widerstand bzw. dessen Leitfähigkeit stark verändern (Hilleringmann, 2004, S. 6). Dadurch nimmt Silizium in der Halbleitertechnologie und in integrierten Schaltungen eine bedeutende Rolle ein. So nutzen Mikroprozessoren, Speicherchips, Logikschaltungen, Thyristoren und Dioden dieses Element (Hilleringmann, 2004, S. 5). Silizium wird in PVA in der PV-Zelle als auch im Wechselrichter verbaut als. In WKA findet Silizium im elektronischen System als auch als Legierungselement Verwendung. In STA wird kein Silizium verwendet.

3.5.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 149) betrug die weltweite Jahresproduktion von Silizium im Jahr 2020 8 Mio. t. Im Jahr 2020 wurden 0,41 Mio. t Silizium weniger produziert als im Jahr 2019. Zum größten Produzenten von Silizium zählt China (5,4 Mio. t), gefolgt von Russland (0,54 Mio. t), Brasilien (0,34 Mio. t), Norwegen (0,33 Mio. t), USA (0,29 Mio. t), Frankreich und Malaysia (beide mit jeweils 0,13 Mio. t), Südafrika (0,096 Mio. t), Island (0,087 Mio. t), Bhutan (0,085 Mio. t), Spanien (0,066 Mio. t), Ukraine (0,06 Mio. t), Kanada (0,057 Mio. t) und Indien (0,055 Mio. t) (siehe Abbildung 24).

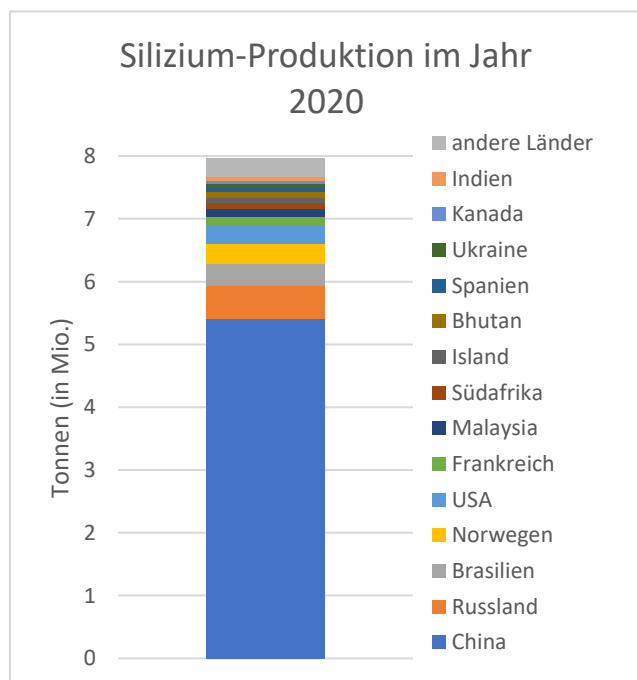


Abbildung 24: Länder mit der größten Silizium-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 149)

Quantitative Angaben zu den Silizium-Reserven der einzelnen Länder sind nicht vorhanden. Jedoch sind die globalen Reserven für Silizium in den meisten Ländern im Verhältnis zur Nachfrage sehr hoch, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die weltweite Nachfrage für viele Jahrzehnte gedeckt ist (USGS, 2021, S. 149).

3.5.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Silizium in den PVA und WKA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 18.746 t und ein maximaler Bedarf von 37.096 t Silizium. Dem steht wie in Kapitel 3.5.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von 8 Mio. t Silizium im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf

einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 160 Mio. t Silizium. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Silizium in Österreich durch den Ausbau von PVA und WKA mindestens etwa 0,01% und maximal etwa 0,02% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Silizium oder etwa 0,2% bis etwa 0,5% einer Weltjahresproduktion.

Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums und der erwartbaren erheblichen Konkurrenzsituation durch die Nachfrage für andere Technologien ist der Siliziumbedarf möglicherweise als kritisch einzuschätzen.

3.6 Zinn

Zinn (Sn) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 50 und zählt zu den Metallen. Zinn besitzt eine relative Atommasse von 118,71 u und seine Dichte beträgt $5,7 \text{ g/cm}^3$ (α -Zinn) bzw. $7,265 \text{ g/cm}^3$ (β -Zinn). Der Schmelzpunkt von Zinn liegt bei $231,93^\circ\text{C}$ und der Siedepunkt bei 2620°C . Zinn ist ein ungiftiges Metall, jedoch sind einige organische Zinnverbindungen hochtoxisch. Das wirtschaftlich bedeutendste Zinnerz ist Kassiterit (SnO_2) (Angerer et al., 2009, S. 269). Zinn wird in PVA und WKA im Wechselrichter verbaut. In STA wird kein Zinn verwendet. Zinn kommt mit einem Anteil von 0,0035% relativ selten in der Erdkruste vor.

3.6.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 173) betrug die weltweite Jahresproduktion von Zinn im Jahr 2020 270.000 t. Zum größten Produzenten von Zinn zählt China (81.000 t), gefolgt von Indonesien (66.000 t), Myanmar (33.000 t), Peru (18.000 t), Demokratische Republik Kongo (17.000 t), Bolivien (15.000 t), Brasilien (13.000 t), Australien (6.800 t), Nigeria (6.000 t), Vietnam (4.900 t), Malaysia (3.300 t), Russland (2.500 t) und Ruanda und Laos (beide mit jeweils 1.200 t) (siehe Abbildung 25).

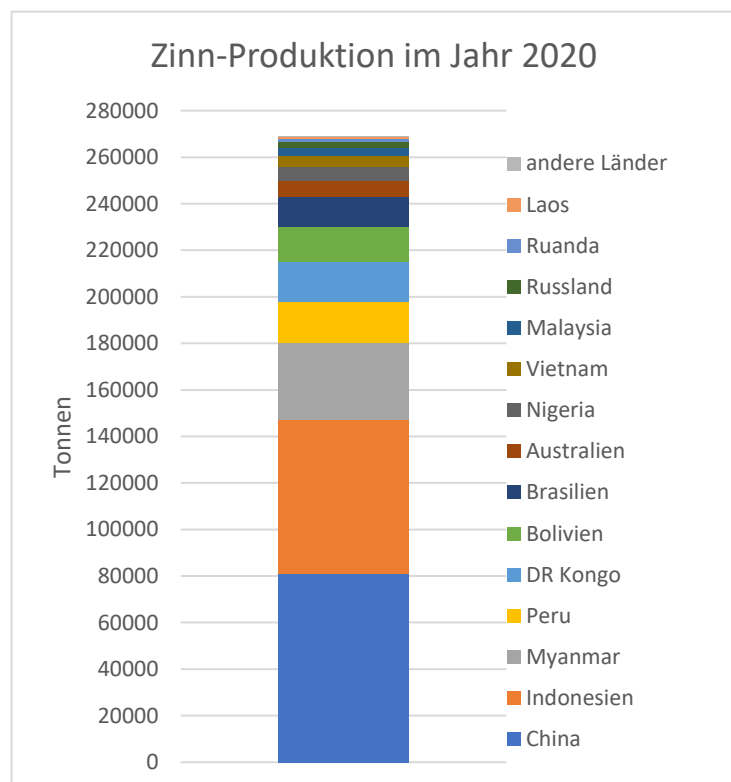


Abbildung 25: Länder mit der größten Zinn-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 173)

Die weltweiten Reserven werden mit 4,3 Mio. t betitelt. China (1,1 Mio. t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von Indonesien (0,8 Mio. t), Australien (0,43 Mio. t), Brasilien (0,42 Mio. t), Bolivien (0,4 Mio. t), Russland (0,28 Mio. t), Demokratische Republik Kongo (0,16 Mio. t), Malaysia (0,15 Mio. t), Peru (0,14 Mio. t), Myanmar (0,1 Mio. t) und Vietnam (0,011 Mio. t) (siehe Abbildung 26) (USGS, 2021, S. 173).

Daten zu den Reserven von Laos, Nigeria und Ruanda sind nicht vorhanden. Aufgrund der weltweiten Ressourcen können die aktuellen jährlichen Produktionszahlen auch in Zukunft aufrechterhalten werden (USGS, 2021, S. 173).

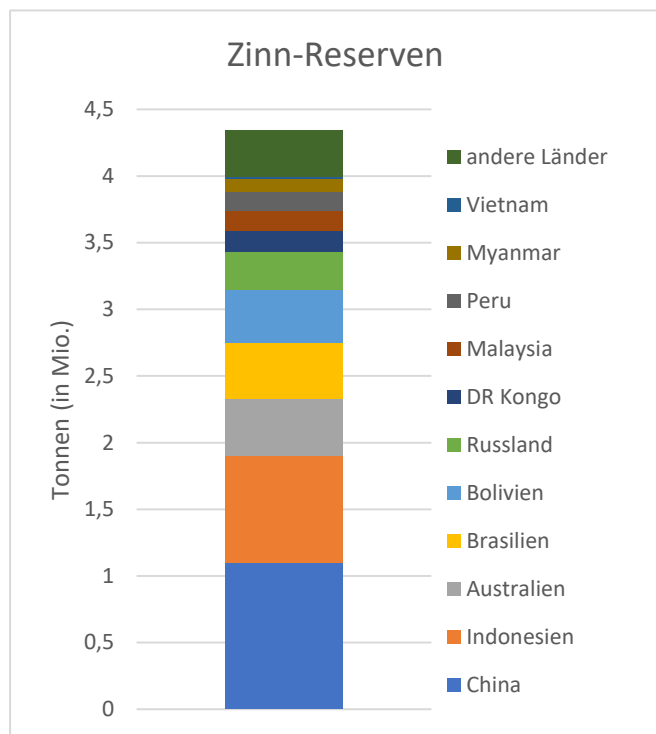


Abbildung 26: Länder mit den größten Zinn-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 173)

3.6.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Zinn in den PVA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 424 t und ein maximaler Bedarf von 848 t Zinn. Dem steht wie in Kapitel 3.6.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von 270.000 t Zinn im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 5,4 Mio. t Zinn. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Zinn in Österreich durch den Ausbau von PVA mindestens etwa 0,008% und maximal etwa 0,02% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Zinn oder etwa 0,16% bis etwa 0,31% einer Weltjahresproduktion.

Sowohl der minimale als auch der maximale Wert scheinen leicht zu decken zu sein. Selbst dann, wenn sich eine große Nachfrage nach Zinn aus anderen Anwendungsfeldern ergibt.

3.7 Silber

Silber (Ag) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 47 und zählt zu den Edelmetallen. Silber besitzt eine relative Atommasse von 107,86 u und seine Dichte beträgt $10,4 \text{ g/cm}^3$. Der Schmelzpunkt von Silber liegt bei $960,8 \text{ °C}$ und der Siedepunkt bei 2212 °C . Silber ist ein hervorragender Wärme- und Elektrizitätsleiter und zeichnet sich durch weitere Eigenschaften wie eine gute Duktilität, Schmiedbarkeit und Reflexionsvermögen aus (Angerer et al., 2009, S. 297). Silber tritt in der Erdkruste als sulfidisches Silbererz auf. Oft wird es jedoch beim Abbau anderer Metalle als Nebenprodukt gewonnen. Silber wird in PVA

im PV-Modul und dem BOS verbaut. In WKA wird Silber im elektronischen System verbaut. In STA wird kein Silber verwendet. Silber kommt mit einem Anteil von 0,0000079% sehr selten in der Erdkruste vor.

3.7.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 151) betrug die weltweite Jahresproduktion von Silber im Jahr 2020 25.000 t. Zum größten Produzenten von Silber zählt Mexiko (5.600 t), gefolgt von Peru (3.400 t), China (3.200 t), Russland (1.800 t), Australien, Chile und Polen (mit jeweils 1.300 t), Bolivien (1.100 t), USA und Argentinien (beide mit jeweils 1.000 t) (siehe Abbildung 27).

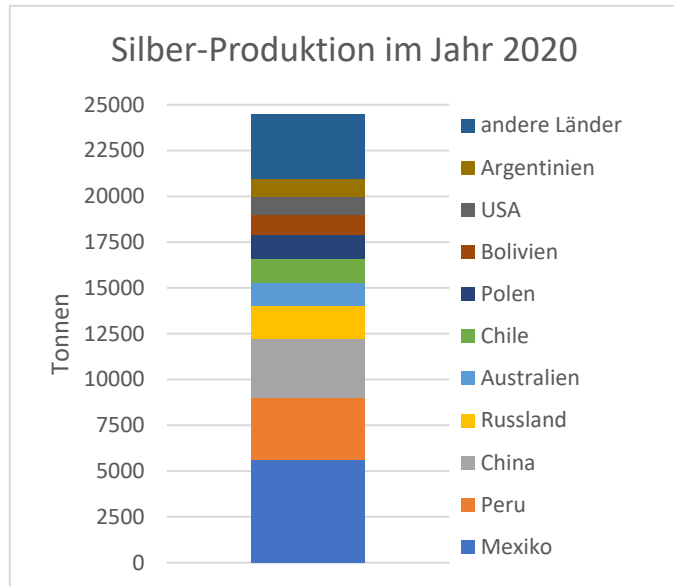


Abbildung 27: Länder mit der größten Silber-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 151)

Die weltweiten Reserven werden mit 500.000 t betitelt. Peru (91.000 t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von Australien (88.000 t), Polen (70.000 t), Russland (45.000 t), China (41.000 t), Mexiko (37.000 t), USA und Chile (beide mit jeweils 26.000 t) und Bolivien (22.000 t) (siehe Abbildung 28). Daten zu den Reserven von Argentinien sind nicht vorhanden (USGS, 2021, S. 151).

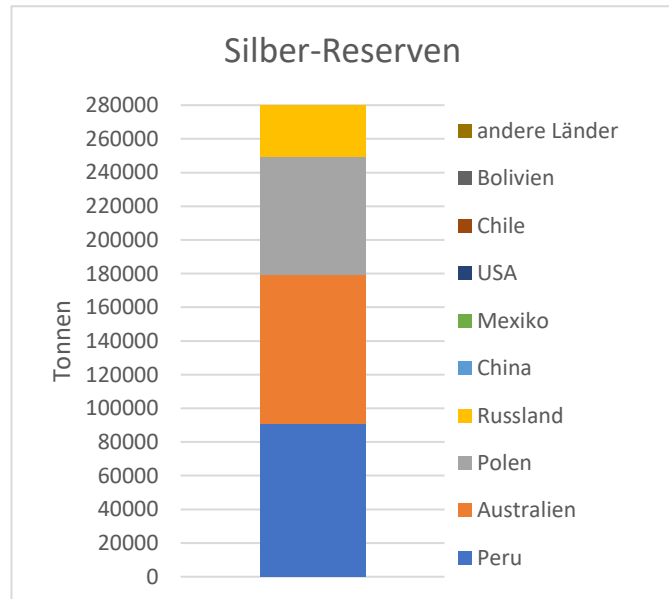


Abbildung 28: Länder mit den größten Silber-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 151)

Obwohl Silber in mehreren Minen als Hauptprodukt gewonnen wird, wird es primär als Nebenprodukt von Blei-Zink-Minen, Kupferminen und Goldminen abgebaut. Diese Minen werden auch in Zukunft einen bedeutenden Anteil der weltweiten Reserven und Ressourcen ausmachen (USGS, 2021, S. 151).

3.7.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Silber in den PVA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 99 t und ein maximaler Bedarf von 199 t Silber. Dem steht wie in Kapitel 3.7.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von 25.000 t Silber im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 500.000 t Silber. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Silber in Österreich durch den Ausbau von PVA mindestens etwa 0,02% und maximal etwa 0,04% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Silber oder etwa 0,4% bis etwa 0,8% einer Weltjahresproduktion.

Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums und der erwartbaren erheblichen Konkurrenzsituation durch die Nachfrage für andere Technologien ist der Silberbedarf möglicherweise als kritisch einzuschätzen.

3.8 Blei

Blei (Pb) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 82 und zählt zu den Metallen. Blei besitzt eine relative Atommasse von 207,2 u und seine Dichte beträgt $11,3 \text{ g/cm}^3$. Der Schmelzpunkt von Blei liegt bei $327,43 \text{ °C}$ und der Siedepunkt bei 1744 °C . Blei wird in PVA im PV-Modul und dem BOS verbaut. In WKA wird Blei im elektronischen System verbaut. In STA wird kein Blei verwendet. Blei kommt mit einem Anteil von 0,0018% selten in der Erdkruste vor.

3.8.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 95) betrug die weltweite Jahresproduktion von Blei im Jahr 2020 4,4 Mio. t. Zum größten Produzenten von Blei zählt China (1,9 Mio. t), gefolgt von Australien (0,48 Mio. t), USA (0,29 Mio. t), Mexiko und Peru (beide mit jeweils 0,24 Mio. t), Russland (0,22 Mio. t), Indien (0,21 Mio. t), Türkei (0,072 Mio. t), Schweden (0,07 Mio. t), Bolivien und Tadschikistan (beide mit jeweils 0,065 Mio. t) und Kasachstan (0,03 Mio. t) (siehe Abbildung 29).

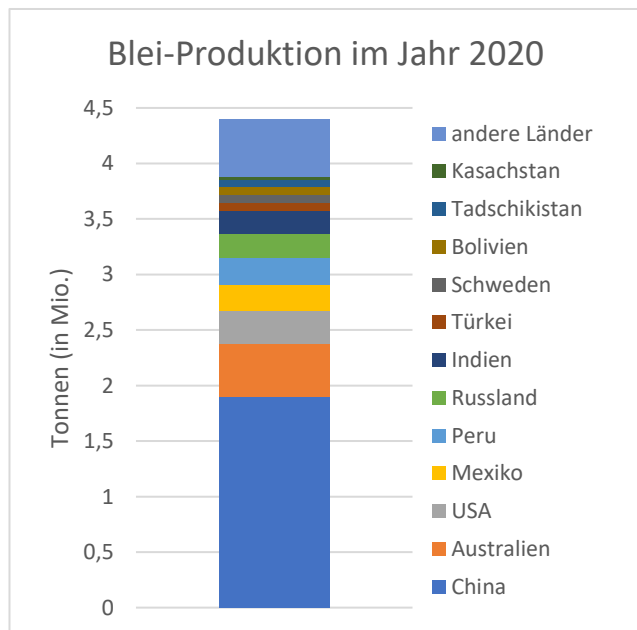


Abbildung 29: Länder mit der größten Blei-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 95)

Die weltweiten Reserven werden mit 88 Mio. t betitelt. Australien (36 Mio. t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von China (18 Mio. t), Peru (6 Mio. t), Mexiko (5,6 Mio. t), USA (5 Mio. t), Russland (4 Mio. t), Indien (2,5 Mio. t), Kasachstan (2 Mio. t), Bolivien (1,6 Mio. t), Schweden (1,1 Mio. t) und Türkei (0,86 Mio. t) (siehe Abbildung 30). Daten zu den Reserven von Tadschikistan sind nicht vorhanden (USGS, 2021, S. 95).

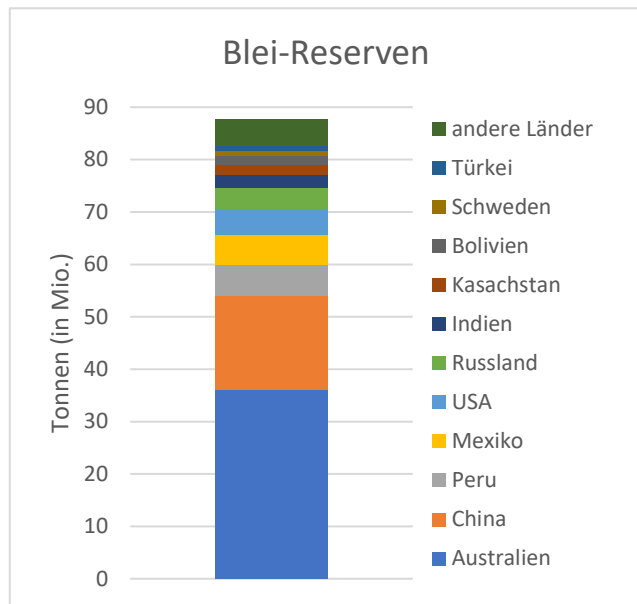


Abbildung 30: Länder mit den größten Blei-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 95)

Die identifizierten weltweiten Bleiressourcen belaufen sich auf mehr als 2 Mrd. t. In den letzten Jahren wurden bedeutende Bleiressourcen in Verbindung mit Zink, Silber- oder Kupfervorkommen in Australien, China, Irland, Mexiko, Peru, Portugal, Russland und den Vereinigten Staaten (Alaska) identifiziert (USGS, 2021, S. 95).

3.8.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Blei in den PVA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 59 t und ein maximaler Bedarf von 119 t Blei. Dem steht wie in Kapitel 3.8.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von etwa 4,4 Mio. t Blei im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 88 Mio. t Blei. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Blei in Österreich durch den Ausbau von PVA mindestens etwa 0,00007% und maximal etwa 0,0001% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Blei oder etwa 0,000002% bis etwa 0,003% einer Weltjahresproduktion. Sowohl der minimale als auch der maximale Wert scheinen leicht zu decken zu sein. Selbst dann, wenn sich eine große Nachfrage nach Blei aus anderen Anwendungsfeldern ergibt.

3.9 Zink

Zink (Zn) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 30 und zählt zu den Übergangsmetallen. Zink besitzt eine relative Atommasse von 65,38 u und seine Dichte beträgt 7,1 g/cm³. Der Schmelzpunkt von Zink liegt bei 419,53 °C und der Siedepunkt bei 907 °C. Zink wird in PVA und WKA im Wechselrichter verbaut. Zink macht etwa 0,004% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3)

3.9.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 191) betrug die weltweite Jahresproduktion von Zink im Jahr 2020 12 Mio. t. Zum größten Produzenten von Zink zählt China (4,2 Mio. t), gefolgt von Australien (1,4 Mio. t), Peru (1,2 Mio. t), Indien (0,72 Mio. t), USA (0,67 Mio. t), Mexiko (0,6 Mio. t), Bolivien (0,33 Mio. t), Kasachstan (0,3 Mio. t), Kanada (0,28 Mio. t), Russland (0,26 Mio. t) und Schweden (0,22 Mio. t) (siehe Abbildung 31).

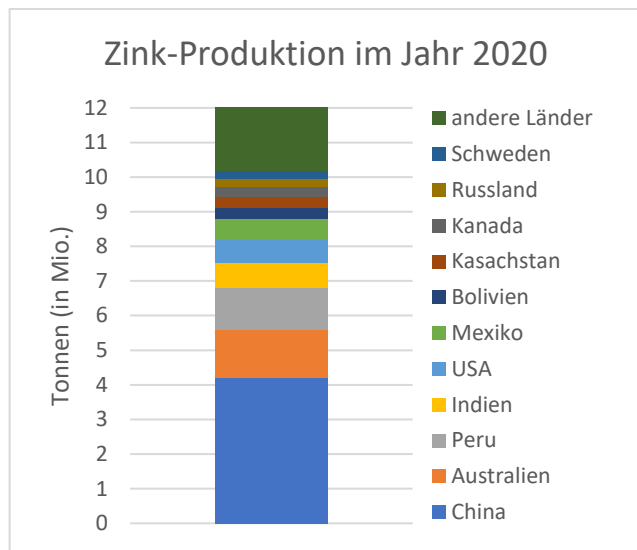


Abbildung 31: Länder mit der größten Zink-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 191)

Die weltweiten Reserven werden mit 250 Mio. t betitelt. Australien (68 Mio. t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von China (44 Mio. t), Russland und Mexiko (beide mit jeweils 22 Mio. t), Peru (20 Mio. t), Kasachstan (12 Mio. t), USA (11 Mio. t), Indien (10 Mio. t), Bolivien (4,8 Mio. t), Schweden (3,6 Mio. t) und Kanada (2,3 Mio. t) (siehe Abbildung 32). (USGS, 2021, S. 191).

Die identifizierten weltweiten Zink-Ressourcen belaufen sich auf etwa 1,9 Mrd. t (USGS, 2021, S. 191).

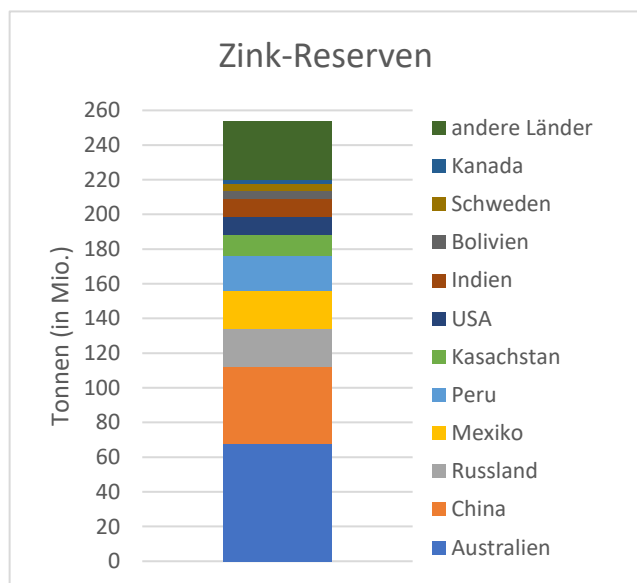


Abbildung 32: Länder mit den größten Zink-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 191)

3.9.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Zink in den PVA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 9 t und ein maximaler Bedarf von 19 t Zink. Dem steht wie in Kapitel 3.9.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von etwa 12 Mio. t Zink im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 240 Mio. t Zink. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Zink in Österreich durch den Ausbau von PVA mindestens etwa 0,000004% und maximal etwa 0,000008% der bis zum

Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Zink oder etwa 0,00008% bis etwa 0,0002% einer Weltjahresproduktion. Sowohl der minimale als auch der maximale Wert scheinen leicht zu decken zu sein. Selbst dann, wenn sich eine große Nachfrage nach Zink aus anderen Anwendungsfeldern ergibt.

3.10 Gold

Gold (Au) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 79 und zählt zu den Übergangsmetallen. Gold besitzt eine relative Atommasse von 196,96 u und seine Dichte beträgt $19,3 \text{ g/cm}^3$. Der Schmelzpunkt von Gold liegt bei $1064,18^\circ\text{C}$ und der Siedepunkt bei 2970°C . Gold wird in PVA und WKA im Wechselrichter verbaut. Gold macht etwa 0,0000004% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3).

3.10.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 71) betrug die weltweite Jahresproduktion von Gold im Jahr 2020 3.200 t. Zum größten Produzenten von Gold zählt China (380 t), gefolgt von Australien (320 t), Russland (300 t), USA (190 t), Kanada (170 t), Ghana (140 t), Indonesien (130 t), Peru (120 t), Kasachstan (100 t), Südafrika, Sudan und Usbekistan (mit jeweils 90 t), Brasilien (80 t), Papua-Neuguinea (70 t), Mali (61 t) und Argentinien (60 t) (siehe Abbildung 33).

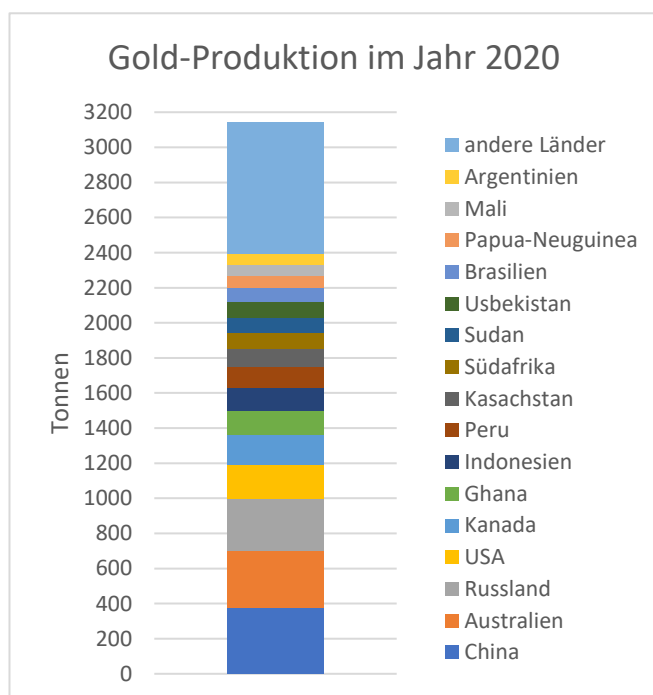
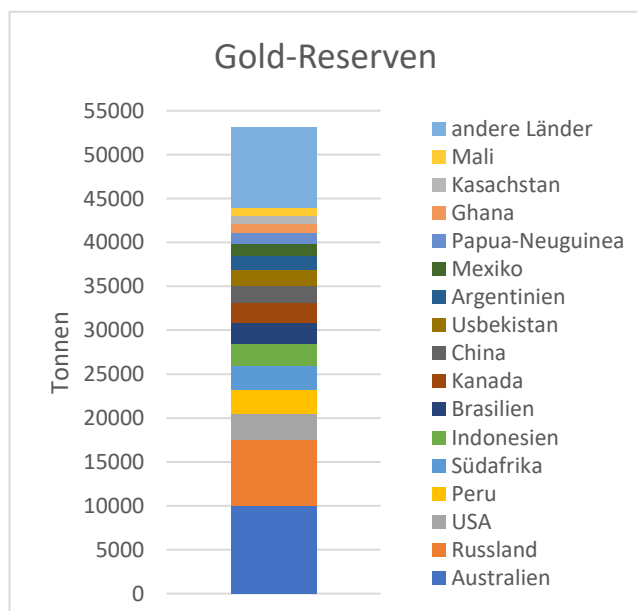


Abbildung 33: Länder mit der größten Gold-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 71)

Die weltweiten Reserven werden mit 53.000 t betitelt. Australien (10.000 t) hält



dabei den größten Teil dieser Reserven. Danach folgen Russland (7.500 t), USA (3.000 t), Peru und Südafrika (beide mit jeweils 2.700 t), Indonesien (2.600 t), Brasilien (2.400 t), Kanada (2.200 t), China (2.000 t), Usbekistan (1.800 t), Argentinien (1.600 t), Mexiko (1.400 t), Papua-Neuguinea (1.200 t), Ghana und Kasachstan (beide mit jeweils 1.000 t) und Mali (800 t) (siehe Abbildung 34).

Daten zu den Reserven von Sudan sind nicht vorhanden (USGS, 2021, S. 71).

3.10.2 Versorgungssituation für Österreich

Abbildung 34: Länder mit den größten Gold-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 71)

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Gold in den PVA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 2 t und ein maximaler Bedarf von 4 t Gold. Dem steht wie in Kapitel 3.10.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von etwa 3.200 t Gold im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 64.000 t Gold. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Gold in Österreich durch den Ausbau von PVA mindestens etwa 0,003% und maximal etwa 0,006% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Gold oder etwa 0,06 % bis etwa 0,125 % einer Weltjahresproduktion. Sowohl der minimale als auch der maximale Wert scheinen leicht zu decken zu sein. Selbst dann, wenn sich eine große Nachfrage nach Gold aus anderen Anwendungsfeldern ergibt.

3.11 Molybdän

Molybdän (Mo) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 42 und zählt zu den Übergangsmetallen. Molybdän besitzt eine relative Atommasse von 95,95 u und seine Dichte beträgt 10,28 g/cm³. Der Schmelzpunkt von Gold liegt bei 2623 °C und der Siedepunkt bei 4612 °C. Molybdän wird in PVA und WKA im Wechselrichter verbaut als auch als Legierungselement von Stahl verwendet. Molybdän macht etwa 0,0014% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3).

3.11.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 111) betrug die weltweite Jahresproduktion von Molybdän im Jahr 2020 300.000 t. Zum größten Produzenten von Molybdän zählt China (120.000 t), gefolgt von Chile (58.000 t), USA (49.000 t), Peru (30.000 t), Mexiko (17.000 t), Armenien (7.000 t), Iran (3.500 t), Russland (2.800 t), Kanada (2.700 t), Mongolei (1.800 t), Türkei (400 t) und Usbekistan (200 t) (siehe Abbildung 35).

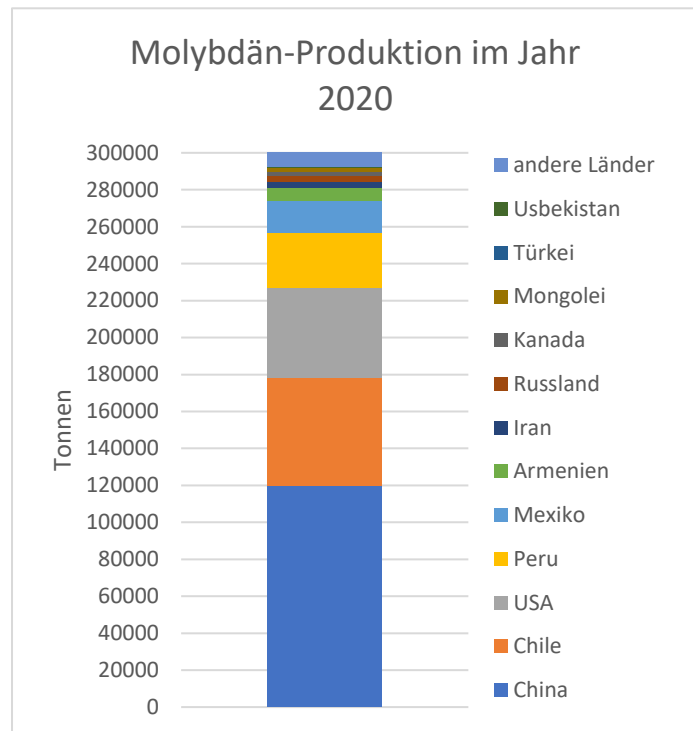


Abbildung 35: Länder mit der größten Molybdän-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 111)

Die weltweiten Reserven werden mit 18 Mio. t betitelt. China (8,3 Mio. t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von Peru (2,8 Mio. t), USA (2,7 Mio. t), Chile (1,4 Mio. Tonnen), Russland (1 Mio. t), Türkei (0,8 Mio. t), Mongolei (0,37 Mio. t), Armenien (0,15 Mio. t), Mexiko (0,13 Mio. t), Argentinien (0,1 Mio. t), Kanada (0,096 Mio. t), Usbekistan (0,06 Mio. t) und Iran (0,043 Mio. t) (siehe Abbildung 36) (USGS, 2021, S. 111).

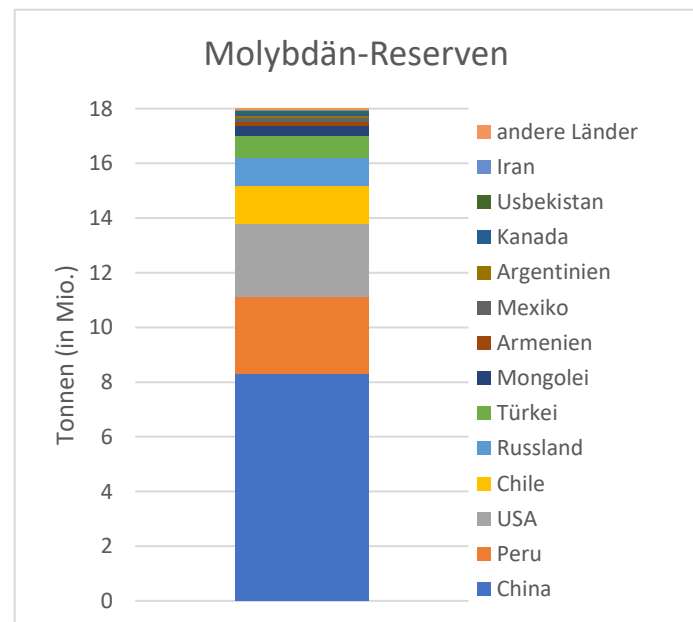


Abbildung 36: Länder mit den größten Molybdän-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 111)

Die identifizierten weltweiten Molybdän-Ressourcen belaufen sich auf etwa 25,4 Mio. t, weshalb der Weltbedarf für die absehbare Zukunft gedeckt werden kann. (USGS, 2021, S. 111).

3.11.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Molybdän in den PVA und WKA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 4.772 t und ein maximaler Bedarf von 7.728 t Molybdän. Dem steht wie in Kapitel 3.11.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von etwa 300.000 t Molybdän im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 6 Mio. t Molybdän. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Molybdän in Österreich durch den Ausbau von PVA und WKA mindestens etwa 0,08% und maximal etwa 0,13% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Molybdän oder etwa 1,6% bis etwa 2,6% einer Weltjahresproduktion.

Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums ist der Molybdänbedarf möglicherweise als kritisch einzuschätzen.

3.12 Palladium

Palladium (Pd) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 46 und zählt zu den Übergangsmetallen. Palladium besitzt eine relative Atommasse von 106,42 u und seine Dichte beträgt 11,9 g/cm³. Der Schmelzpunkt von Palladium liegt bei 1554,9 °C und der Siedepunkt bei 2960 °C. Palladium wird in PVA und WKA im Wechselrichter verbaut. Palladium macht etwa 0,0000011% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3).

3.12.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 125) betrug die weltweite Jahresproduktion von Palladium im Jahr 2020 210 t. Zum größten Produzenten von Palladium zählt Russland (91 t), gefolgt von Südafrika (70 t), Kanada (20 t), USA (14 t) und Simbabwe (12 t). Die weltweite Jahresproduktion aller anderen Länder belief sich auf insgesamt 2,6 t (siehe Abbildung 37).

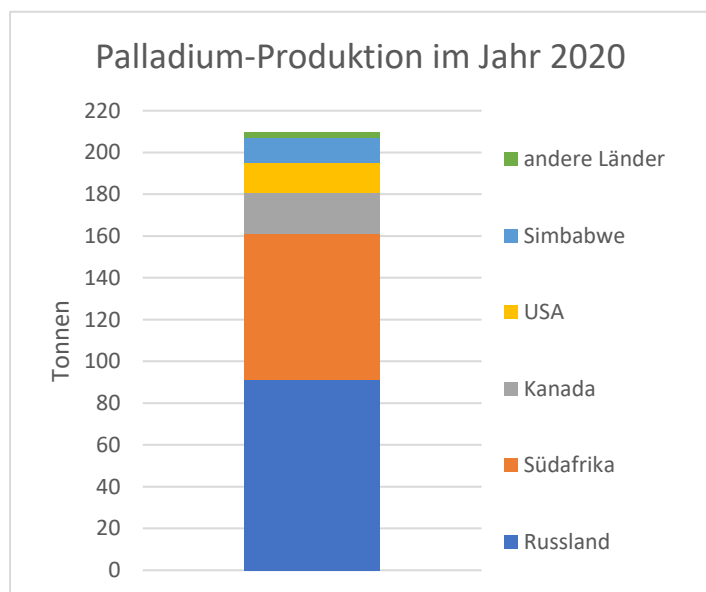


Abbildung 37: Länder mit der größten Palladium-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 125)

Daten zu den weltweiten Palladium-Reserven sind nicht vorhanden. Lediglich für die Platingruppenmetalle (PGM) gibt es Daten. Zu den PGM zählen die Metalle Palladium, Platin, Iridium, Osmium, Rhodium und Ruthenium. Die weltweiten PGM-Reserven werden mit 69.000 t beziffert. Südafrika (63.000 t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von Russland (3.900 t), Simbabwe (1.200 t), USA (900 t) und Kanada (310 t) (siehe Abbildung 38). Angaben zu den PGM-Reserven der restlichen Länder der Welt sind nicht vorhanden (USGS, 2021, S. 125).

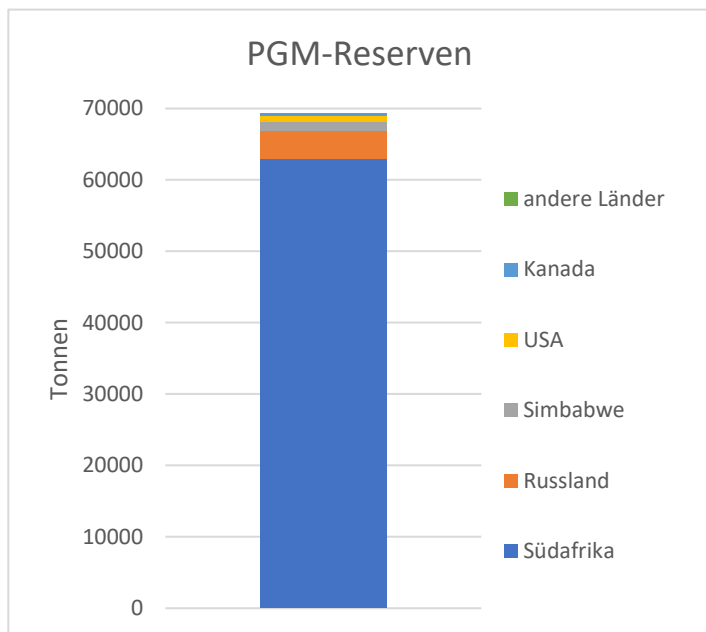


Abbildung 38: Länder mit den größten Palladium-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 125)

Die identifizierten weltweiten PGM-Ressourcen belaufen sich auf etwa 100.000 t. Die größten Reserven liegen im Bushveld-Komplex in Südafrika (USGS, 2021, S. 125).

3.12.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Palladium in den PVA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 0,005 t und ein maximaler Bedarf von 0,01 t Palladium. Dem steht wie in Kapitel 3.12.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von etwa 210 t Palladium im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 4.200 t Palladium. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Palladium in Österreich durch den Ausbau von PVA mindestens etwa 0,0001% und maximal etwa 0,0002% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Palladium oder etwa 0,002% bis etwa 0,005% einer Weltjahresproduktion. Sowohl der minimale als auch der maximale Wert scheinen leicht zu decken zu sein. Selbst dann, wenn sich eine große Nachfrage nach Palladium aus anderen Anwendungsfeldern ergibt.

3.13 Chrom

Chrom (Cr) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 24 und zählt zu den Übergangsmetallen. Chrom besitzt eine relative Atommasse von 51,99 u und seine Dichte beträgt 7,1 g/cm³. Der Schmelzpunkt von Chrom liegt bei 1907 °C und der Siedepunkt bei 2482 °C. Chrom wird in PVA und WKA im Wechselrichter verbaut als auch als Legierungselement von Stahl verwendet. Chrom macht etwa 0,019% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3).

3.13.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 47) betrug die weltweite Jahresproduktion von Chrom im Jahr 2020 40 Mio. t. Zum größten Produzenten von Chrom zählt Südafrika (16 Mio. t), gefolgt von Kasachstan (6,7 Mio. t), Türkei (6,3 Mio. t), Indien (4 Mio. t) und Finnland (2,4 Mio. t). Die weltweite Jahresproduktion aller anderen Länder belief sich auf insgesamt 4,8 Mio. t.

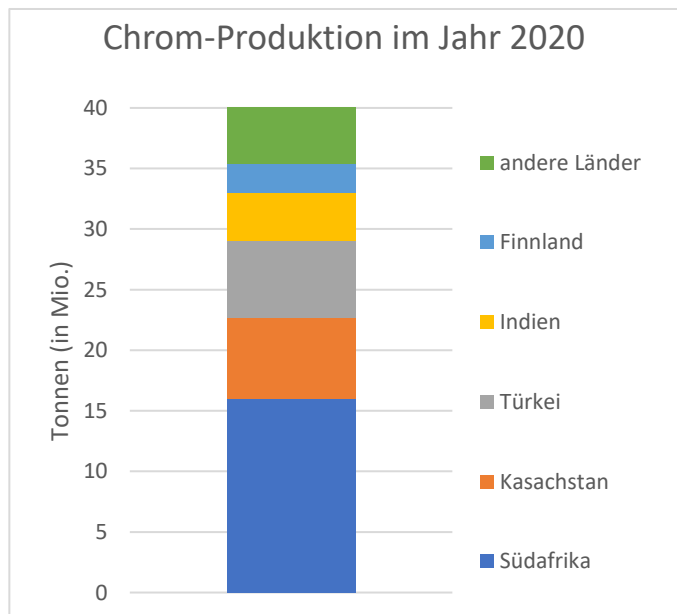


Abbildung 39: Länder mit der größten Chrom-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 47)

Die weltweiten Reserven werden mit 570 Mio. t betitelt. Kasachstan (230 Mio. t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von Südafrika (200 Mio. t), Indien (100 Mio. t), Türkei (26 Mio. t), Finnland (13 Mio. t) und USA (620.000 t). Angaben zu den Chrom-Reserven der restlichen Länder der Welt sind nicht vorhanden (USGS, 2021, S. 47).

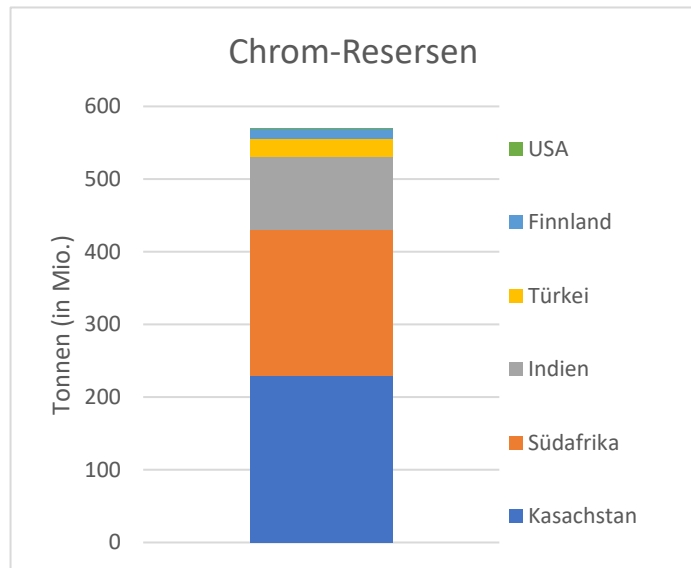


Abbildung 40: Länder mit den größten Chrom-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 47)

Die identifizierten weltweiten Chrom-Ressourcen belaufen sich auf mehr als 12 Mrd. t, weshalb der Weltbedarf für die absehbare Zukunft gedeckt werden kann. 95% der weltweiten Chrom-Ressourcen befinden sich in den beiden Ländern Kasachstan und Südafrika. Die Chrom-Ressourcen der USA befinden sich hauptsächlich im Stillwater-Komplex in Montana (USGS, 2021, S. 47).

3.13.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Chrom in den PVA und WKA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 26.838 t und ein maximaler Bedarf von 43.403 t Chrom. Dem steht wie in Kapitel 3.13.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von etwa 40 Mio. t Chrom im Jahr 2020 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 800 Mio. t Chrom. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Chrom in Österreich durch den Ausbau von PVA und WKA mindestens etwa 0,003% und maximal etwa 0,005% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Chrom oder etwa 0,07% bis etwa 0,11% einer Weltjahresproduktion.

Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums und der erwartbaren erheblichen Konkurrenzsituation durch die Nachfrage für andere Technologien ist der Chrombedarf möglicherweise als kritisch einzuschätzen.

3.14. Mangan

Mangan (Mn) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 25 und zählt zu den Übergangsmetallen. Mangan besitzt eine relative Atommasse von 55,93 u und seine Dichte beträgt 7,47 g/cm³. Der Schmelzpunkt von Mangan liegt bei 1246 °C und der Siedepunkt bei 2100 °C. Mangan wird in PVA und WKA als Legierungselement von Stahl verwendet. Mangan macht etwa 0,009% des Aufbaus der Erdkruste aus (Budd, 1999, S. 3).

3.14.1 Vorkommen

Laut USGS (2020, S. 105) betrug die weltweite Jahresproduktion von Mangan im Jahr 2019 19 Mio. t. Zum größten Produzenten von Mangan zählt Südafrika (5,5 Mio. t), gefolgt von Australien (3,2 Mio. t), Gabun (2,4 Mio. t), Ghana (1,4 Mio. t), China (1,3 Mio. t), Brasilien (1,2 Mio. t) und Indien (1,0 Mio. t). Die weltweite Jahresproduktion aller anderen Länder belief sich auf insgesamt 3,0 Mio. t.

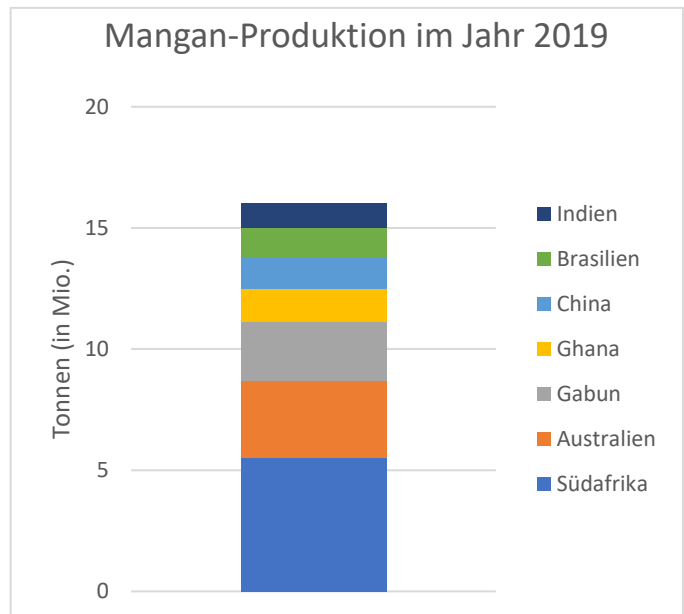


Abbildung 41: Länder mit der größten Mangan-Produktion (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 105)

Die weltweiten Reserven werden mit 810 Mio. t betitelt. Südafrika (260 Mio. t) hält dabei den größten Teil dieser Reserven, gefolgt von Brasilien und der Ukraine (beide mit jeweils 140 Mio. t), Australien (100 Mio. t), Gabun (61 Mio. t), China (54 Mio. t) und Indien (34 Mio. t). Die weltweiten Mangan-Reserven aller anderen Länder belaufen sich auf etwa 23,0 Mio. t (USGS, 2021, S. 47)

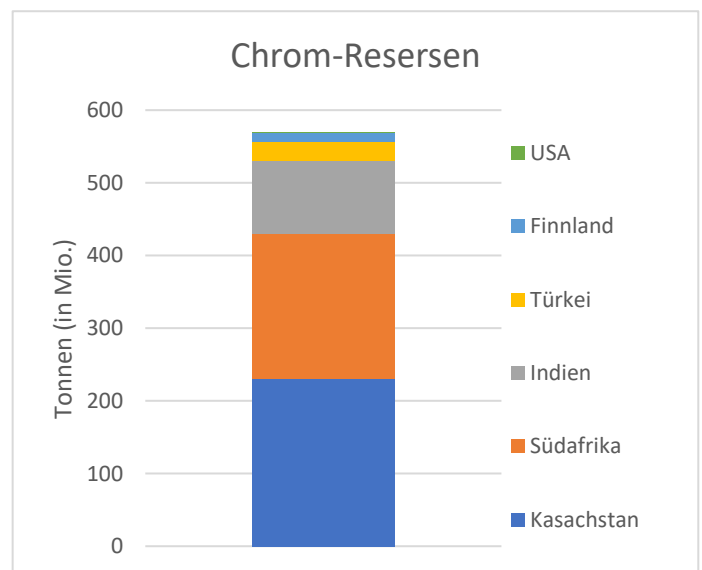


Abbildung 42: Länder mit den größten Mangan-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 105)

Die weltweiten Mangan-Ressourcen an Land sind groß, jedoch unregelmäßig verteilt. Jene Mangan-Ressourcen in den Vereinigten Staaten sind von geringer Qualität zu betrachten und haben potenziell hohe Abbaukosten. Auf Südafrika entfallen etwa 74 % der weltweit identifizierten Mangan-Ressourcen, auf die Ukraine entfallen etwa 10 % (USGS, 2021, S. 105).

3.14.2 Versorgungssituation für Österreich

In Tabelle 17 wurden die kumulierten Bedarfe an Mangan in den PVA und WKA Österreichs bis zum Jahr 2040 ermittelt. Demnach ergibt sich für den Ausbau dieser erneuerbaren Energie im Zeitraum von 2020 bis 2040 ein minimaler Bedarf von 5.507 t und ein maximaler Bedarf von 8.962 t Mangan. Dem steht wie in Kapitel 3.14.1 gezeigt eine weltweite Jahresproduktion von etwa 19 Mio. t Mangan im Jahr 2019 gegenüber. Geht man von einer weiteren Förderung auf einem ähnlichen Niveau aus, ergibt sich bis zum Jahr 2040 eine weltweite Gesamtförderung von etwa 380 Mio. t Mangan. Somit entspricht der potenzielle Bedarf an Mangan in Österreich durch den Ausbau von PVA und WKA mindestens etwa 0,001% und maximal etwa 0,002% der bis zum Jahr 2040 erwartbaren Produktion von Mangan oder etwa 0,03% bis etwa 0,05% einer Weltjahresproduktion.

Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums und der erwartbaren erheblichen Konkurrenzsituation durch die Nachfrage für andere Technologien ist der Manganbedarf möglicherweise als kritisch einzuschätzen.

3.15 Zusammenfassung

In Kapitel 3 wurden die identifizierten kritischen Metalle näher analysiert. Es zeigt sich, dass die geologische Verfügbarkeit der kritischen Rohstoffe einen Ausbau der erneuerbaren Energien im Zeitraum 2020 bis 2040 in Österreich zwar erlauben, jedoch der Bedarf für einzelne Rohstoffe (Aluminium, Kupfer, Eisen, Silizium, Silber, Molybdän, Chrom, Mangan) möglicherweise als kritisch zu betrachten ist. Dies ist durch die erwartbare erhöhte Nachfrage für andere Technologien zu erklären.

Die bedeutendsten Länder für die weltweite Produktion der identifizierten kritischen Rohstoffe sind Australien, China, Brasilien, Indien, Russland, Südafrika, Kanada und USA. Etwa 90% der weltweiten Bergbauproduktion befindet sich in diesen acht Ländern. Australien nimmt hierbei mit etwa 564 Mio. t im Jahr 2020 eine führende Rolle in der Produktion der kritischen Rohstoffe ein, wovon jedoch etwa 560 Mio. t auf die Produktion von Eisen entfallen. China hat die diversifizierteste Bergwerksproduktion. So nahm China im Jahr 2020 die führende Rolle bei der Produktion von Aluminium, Kupfer, Silizium, Zink, Zinn, Blei, Gold und Molybdän ein. Die bedeutendsten Länder für die weltweiten Reserven der identifizierten Rohstoffe sind Australien, Brasilien, Russland, China, Guinea, Indien und Vietnam. Etwa 85% der weltweiten Reserven befinden sich in diesen sieben Ländern (siehe Abbildung 41).

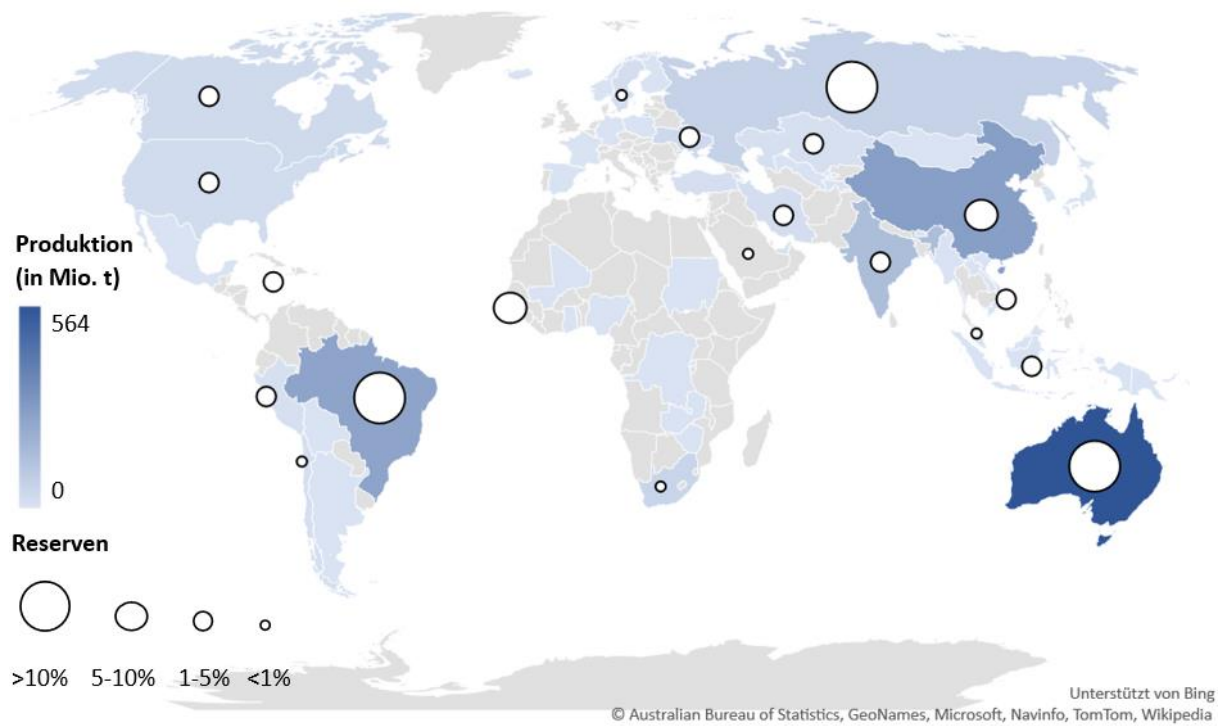


Abbildung 43: Länder mit dem größten Anteil an der Produktion der identifizierten kritischen Rohstoffe (farbig) und an den Reserven (Kreise).

4. Handlungsmöglichkeiten für metallische Rohstoffe

Auch wenn die geologische Verfügbarkeit eine Versorgung mit kritischen Rohstoffen für STA, PVA und WKA Österreichs in der Zukunft ermöglicht, sind dennoch langfristige Strategien zur Rohstoffsicherung notwendig. In diesem Kapitel werden mögliche Maßnahmen für metallische Rohstoffe präsentiert und in Bezug auf ihre Effektivität und Realisierbarkeit analysiert. Dabei wird vor allem die Rolle der verantwortlichen Akteure, allen voran Industrie und Staat, betrachtet.

4.1 Expertise und Wissenstransfer

Die Rohstoffversorgung ist Aufgabe der Unternehmen (Weber, 2012, S. 11). Daher ist es für diese wichtig, möglichst flexibel auf Schwankungen an den Rohstoffmärkten reagieren zu können. Hierfür benötigen diese gute und zuverlässige Daten (acatech et al., 2017, S. 28). In Österreich stellen die Geologische Bundesanstalt (GBA) und zahlreiche Bundesministerien wie etwa das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMWFW), das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) und das Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) Informationen zu geologischen, rohstoffökonomischen und ökologischen Fragen zur Verfügung.

Im Jahr 2012 wurde von der GBA der österreichische Rohstoffplan veröffentlicht. Dieser zielt darauf ab, Rohstoffvorkommen auf ihre Sicherungswürdigkeit zu erfassen und zu evaluieren. In weiterer Hinsicht wurden die identifizierten Gebiete gemeinsam mit den Bundesländern konfliktbereinigt. Dadurch wurden Rohstoffgebiete identifiziert, die in keiner Weise mit anderen Schutzgütern, wie etwa Siedlungsgebieten, Nationalparks, Natura-2000 Gebieten etc., in Widerspruch stehen. Nahezu in allen Versorgungsregionen Österreichs konnten konfliktbereinigte Vorkommen von Rohstoffen für die nächsten Generationen festgestellt werden. Darunter 250 Vorkommen von Erzen, Industriemineralen und Energierohstoffe. Der österreichische Rohstoffplan sieht jedoch nicht vor, dass diese Rohstoffvorkommen in der Zukunft auch tatsächlich genutzt werden. Jedoch soll gewährleistet sein, dass bei Bedarf die Zugänglichkeit zu den Rohstoffvorkommen vorhanden ist. Der Österreichische Rohstoffplan der GBA wurde von der Europäischen Kommission als „Best-Practice“-Beispiel für eine raumordnerische Sicherung des Ressourcenzugangs bezeichnet. (Weber, 2012, S. 11–12).

Im Jahr 2012 erschien der Ressourceneffizienz Aktionsplan (REAP) im Auftrag des damaligen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (BMLFUW). Der REAP entstand im Zuge eines Stakeholderprozesses und wurde als Antwort auf die EU-Initiative „Ressourcenschonendes Europa“ dargelegt. Der REAP zeigt Wege zur Erhöhung der inländischen Ressourceneffizienz auf, wobei wichtige Aktionsfelder identifiziert und Maßnahmen für eine Umsetzung vorgeschlagen werden. Der REAP versteht sich als Wegweiser für eine absolute Entkopplung der österreichischen Wirtschaftsentwicklung vom Ressourcenverbrauch und den damit einhergehenden negativen Umweltauswirkungen (vgl. Manstein & Tertschnig, 2012).

Im Jahr 2020 erschien das Österreichische Montan-Handbuch im 94. Jahrgang im Auftrag des BMLRT (vgl. Mayer-Jauck, 2020). Darin sind die wichtigsten Kennzahlen des österreichischen Bergbaus enthalten. Zudem zeigt es aktuelle Entwicklungen bei der Versorgung der österreichischen Wirtschaft mit mineralischen Rohstoffen auf. Die im

Montan-Handbuch enthaltenen Daten bilden eine wichtige Basis für eine zukunftsorientierte Ressourcenpolitik. Ebenso finden sich im Montan-Handbuch Namen und Adressen von Behörden, Organisationen, Institutionen, Vereinen, Prüfstellen, Sachverständigen, Dienstleistungsbetrieben und Rohstoffgewinnungsbetrieben (vgl. Mayer-Jauck, 2020).

Um ein reibungsloses Zusammenspiel von staatlichen Behörden und rohstoffverbrauchenden Unternehmen zu garantieren, ist Rohstoffexpertise und Wissenstransfer auf beiden Seiten erforderlich. Auf diese Weise können staatliche Behörden Informationen erstellen und an Unternehmen weitergeben. Jene Unternehmen können dann Schwankungen am Rohstoffmarkt besser interpretieren und darauf reagieren (acatech et al., 2017, S. 28).

4.1.1 Offenlegungspflicht für geologische Daten

Das österreichische Lagerstättengesetz erlaubt es den Beauftragten der GBA, die Daten über die im Zuge der Erkundung des österreichischen Untergrundes bekanntgewordenen Tatsachen geheim zu halten (§ 6 BGBl. Nr. 246/1947). Jedoch könnte ein modernes Lagerstättengesetz, dem zufolge alle Daten nach einer gewissen Karenzzeit öffentlich gemacht werden müssen, dazu beitragen, dass Wissenschaft und Industrie neue Explorationswege und Konzepte entwickeln. Dies könnte volkswirtschaftlich von hohem Nutzen sein. Solche modernen Lagerstättengesetze wurden bereits in Ländern wie etwa Norwegen, Schweden, Finnland, Serbien, den Niederlanden, Kanada, Australien und Neuseeland bereits umgesetzt. Die neue Gesetzgebung hat in diesen Ländern nicht dazu beigetragen, dass Aufsuchungs- und Gewinnungsaktivitäten darunter leiden (acatech et al., 2017, S. 29).

4.1.2 Internationale Zusammenarbeit

Jeder Staat sammelt und verwaltet Informationen über die globalen Rohstoffvorkommen (vgl. Brown et al., 2020; USGS, 2021). Im Zuge einer intensiveren internationalen Vernetzung könnten jedoch Synergieeffekte genutzt und Kosten gespart werden. Das Projekt „Minerals4EU“ ist bereits eine wichtige Entwicklung in diese Richtung. Es wurde entwickelt, um die Empfehlungen der EU-Rohstoffinitiative zu erfüllen, indem ein europaweites Wissensnetzwerk aufgebaut wird. So soll eine Online-Plattform zur Bereitstellung von Daten über die Rohstoffversorgung in Europa entstehen. Ebenso soll ein jährlich aktualisiertes europäisches Jahrbuch für Mineralien in Europa veröffentlicht werden und weiters sollen regelmäßige Studien über die politischen, ökonomischen und technologischen Entwicklungen der Rohstoffmärkte durchgeführt werden. Das Projekt „Minerals4EU“ wird derzeit von 32 Partnern, darunter 26 nationale geologische Dienste, unterstützt. Österreich ist Teil dieses Projekts (Minerals Intelligence Network for Europe, 2021).

Ein weiterer Grundstein wurde bereits im Jahr 1995 mit der Gründung des „EuroGeoSurveys“ (EGS), der Gemeinschaft aller europäischen Geologie-Dienste, gelegt. Österreich und 37 weitere nationale Geologie-Dienste sind Mitglied dieser Gemeinschaft. EGS bietet fachkundige Beratung für europäische Institutionen und deren Regierungen an. Gemeinsam mit dem Projekt „Minerals4EU“ kann Europas Wissensbasis in Hinblick auf wichtige Rohstoffe somit dauerhaft gestärkt werden (EGS, 2021).

Internationale Vernetzung ist im Zuge vieler wirtschaftsstrategischer Metalle gefragt. Da diese Märkte sehr intransparent sind, ist die Informationsbeschaffung und Informationsbereitstellung mit großen Herausforderungen verbunden. Hier könnte als Vorbild

das Model der International Metal Study Groups herangezogen werden (acatech et al., 2017, S. 30). Die International Metal Study Groups sind Arbeitsgruppen bestehend aus Vertretern von Regierungen, Produzenten und Verbrauchern, deren Ziel es ist, die Märkte einiger Metalle transparenter zu gestalten. Für Kupfer, Nickel, Blei und Zink gibt es bereits solche Arbeitsgruppen (vgl. ICSG, 2021; ILZSG, 2021; INSG, 2021).

Mit ebenso großen Herausforderungen verbunden ist die Versorgung der EU mit Seltenen Erden. Aufgrund der mangelnden internen Versorgung muss die EU mehr als 90 % dieser Metalle importieren, wobei der Großteil dieser Importe aus China stammt. Da die EU den Zugang zu diesen Metallen als auch die Abbaumethoden verbessern will und den Verbrauch reduzieren möchte, wurde das Projekt „European Rare Earths Competency Network“ (ERECON Network) initiiert (KOM, 2016). Somit könnte das ERECON Network als Ausgangsbasis dienen und ähnlich den International Metal Study Groups auf weitere Metalle ausgeweitet werden.

4.2 Versorgungssicherheit

Um die Rohstoffabhängigkeit von Lieferländern wie etwa China zu reduzieren, müssen inländische Rohstoffquellen stärker und effizienter genutzt werden. Ebenso kann eine Diversifizierung der Lieferländer zu einer Erhöhung der Versorgungssicherheit führen. Im Folgenden werden mögliche Handlungsoptionen aufgezeigt, um die Versorgungssicherheit zu verbessern.

4.2.1 Recycling

Österreich ist bei den meisten NE-Metallen von Importen abhängig. Bei Aluminium, Antimon, Arsen, Kadmium, Gallium, Germanium, Lithium, Quecksilber, Seltenen Erden, Tellur, Wismut, Zink und Zinn herrscht sogar eine völlige Importabhängigkeit. Bei Blei liegt die Importabhängigkeit bei etwa 30 %. Bei Kupfer übersteigt die inländische Produktion den Bedarf deutlich. Blei und Kupfer werden jedoch vollständig auf Basis von Sekundärmaterial produziert. Eine völlige Importabhängigkeit herrscht auch bei den Edelmetallen wie etwa Gold und Silber (Weber, 2012, S. 44).

Weil Österreich über umfangreiche Sekundärlagerstätten aus Altmetall verfügt, allen voran im Bereich der Altfahrzeuge, Elektroaltgeräte und Windkraftanlagen (Luidold et al., 2011, S. 204), kann ein umfassendes und effizientes Recyclingsystem zu einer nachhaltigeren und sichereren Versorgung mit Metallen führen. Zur Verbesserung der Recyclingraten bestimmter Metalle müssen ökonomische und verbraucherfreundliche Anreize für Industrie und Gesellschaft geschaffen werden. Auf diese Weise können in Zukunft mehr Metalle zurückgewonnen werden als es heute der Fall ist (acatech et al., 2017, S. 31).

Systematische Erfassung der Recyclingströme

Der Recyclingprozess lässt sich in 4 Prozessstufen gliedern: Sammlung und Vorsortierung, Vorbehandlung und Demontage, mechanische und chemische Aufbereitung und Herstellung von Werkstoffen und Grundstoffen. Der erste Prozessschritt wird vom Abfallbesitzer vorgenommen, während im letzten Prozessschritt Sekundärrohstoffe in etablierte Produktionsprozesse eingebracht und genutzt werden. Dabei werden in sogenannten Hüttenprozessen Metalle und Legierungen erzeugt (Martens & Goldmann, 2016, S. 19–23). Europaweit gibt es nur wenige Metallhütten, die das gesamte Altmetall metallurgisch

verarbeiten. Aus diesem Grund verdichten sich die Abfallströme zum Ende des Recyclingprozesses. Zwar gibt es für fast alle Metalle leistungsfähige Recyclingprozesse, jedoch gehen auf allen Prozessstufen Stoffe verloren. So werden Abfälle unzureichend oder fehlerhaft gesammelt oder es entstehen Verluste in der mechanischen und chemischen Aufbereitung oder bei der Herstellung von Werkstoffen und Grundstoffen. Aus diesem Grund müssen die Abfallmengen systematisch erfasst werden und bis zum Ende des Recyclingprozesses in der Recyclingkette bleiben (acatech et al., 2017, S. 31).

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der aktuellen Situation bietet das Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002). Das Abfallwirtschaftsgesetz beinhaltet rein massenbezogene Recyclingquoten für die stoffliche Verwertung von Abfällen. Dadurch liegt der Fokus bei der Rückgewinnung von massenreichen Rohstoffen wie etwa Stahl, Aluminium, Kunststoff und Glas. Aufgrund dessen bleiben die in viel kleineren Mengen vorhandenen Nichteisen-, Edel- und Sondermetalle für eine massenbasierte Recyclingquote nahezu unberücksichtigt. Mögliche Lösungsansätze beinhalten die Weitergabe von Informationen über die Wertstoffinhalte für Produzenten und Entsorger als auch die Agglomeration von Abfällen mit ähnlicher Metallzusammensetzung. Jedoch müssten geeignete Erfassungssysteme erst entwickelt werden (acatech et al., 2017, S. 32).

Ein weiterer Lösungsansatz zur Verbesserung der aktuellen Situation besteht in der europaweiten Umsetzung verbindlicher technischer Recyclingstandards für ressourcenrelevante Produktgruppen. Hierbei sollten neben den Kriterien der Recyclingprozesse auch wirtschaftliche, ökologische als auch soziale Aspekte mit einfließen. Die ressourcenrelevanten Metalle müssten in Anlagen verarbeitet werden, die nach diesen technischen Recyclingstandards zertifiziert und auditert sind. Damit wäre ein effizientes Recycling nach dem aktuellen Stand der Technik garantiert (acatech et al., 2017, S. 33).

Verbraucherfreundliche Gestaltung der Sammelsysteme

Im Jahr 2019 wurden österreichweit 241.001 t Elektro- und Elektronikgeräte in Verkehr gesetzt. Dabei wurden 210.195 t Elektro- und Elektronikgeräte für Haushalte und 30.806 t Elektro- und Elektronikgeräte für das Gewerbe in Umlauf gebracht (siehe Tabelle 18) (Weismayr, 2021, S. 59).

Tabelle 18: In Verkehr gesetzte Elektro- und Elektronikgeräte 2019 (Eigene Darstellung) (Weismayr, 2021, S. 59)

Elektro- und Elektronikgeräte	Geräte für Haushalte (t)	Geräte für das Gewerbe (t)	Geräte gesamt (t)
Großgeräte	103.023	13.548	116.572
Photovoltaikmodule	-	7.043	7.043
Kühl- und Gefriergeräte	33.368	3.401	36.769
Bildschirmgeräte einschließlich Bildröhrengeräte	13.433	524	13.957
Elektro-Kleingeräte	58.989	6.272	65.260
Lampen	1.382	18	1.400
Gesamt	210.195	30.806	241.001

Laut Weismayr (2021, S. 60) wurden in Österreich im Jahr 2019 insgesamt etwa 133.048 t Elektro- und Elektronikgeräte aus dem privaten und gewerblichen Bereich gesammelt, wobei sich die Sammelmassen wie folgt verteilen:

- Großgeräte (67.932 t)
- Elektro-Kleingeräte (39.234 t)
- Kühl- und Gefriergeräte (14.708 t)
- Bildschirmgeräte einschließlich Bildröhrengeräte (10.193 t)
- Lampen (978 t)
- Photovoltaikmodule (2 t)

Um möglichst viele wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen, müssen die Konsumenten ihre Altprodukte richtig entsorgen. In Österreich gibt es viele Möglichkeiten, Elektro-Altgeräte zu entsorgen (Mistplätze, Problemstoffsammelstellen, Batterieboxen in Supermärkten). Dennoch werden sie von den Konsumenten oft nicht genutzt, weil die Entsorgung dieser Geräte als zu aufwendig empfunden wird. Aus diesem Grund werden Elektro-Altgeräte oft gehortet oder im Restmüll entsorgt, womit sie dem Recyclingprozess nicht zugeführt werden können (acatech et al., 2017, S. 34; Lambert et al., 2014, S. 1; Weismayr, 2021, S. 60). So fanden sich im Jahr 2018 in den 1.458.000 t Restmüll etwa 850 t Alt-Batterien und 11.000 t Elektro-Kleingeräte. Das bedeutet, dass jede/r Einwohner/in Österreichs im Jahr 2018 1,3 kg Elektrogeräte und 0,1 kg Batterien im Restmüll entsorgt hat (Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH, 2019, S. 4).

Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, bedarf es entweder konkreter finanzieller Anreize oder eines unkomplizierten Rückgabeprozesses, der dem Konsumenten wenig bis kaum Aufwand verursacht. Ebenso könnten Pfandsysteme für Elektro-Altgeräte oder Leasingmodelle ein Ansatz für ein verbessertes Recycling sein. Der Vorteil solcher Systeme liegt darin, dass das Eigentum an den Elektro-Altgeräten auf wenige professionelle Hersteller und Leasinggeber beschränkt bliebe. Diese Hersteller und Leasinggeber verfügten damit über eine hohe Masse an Altprodukten und könnten direkte Recyclingverträge mit Recyclern abschließen. Dies würde transparente Stoffströme und ein qualitatives und kosteneffizientes Recycling erlauben (acatech et al., 2017, S. 34).

Stopp illegaler Elektroschrott-Exporte

Die Abfallmenge von Elektro- und Elektronikgeräten hat in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Im Jahr 2011 wurden weltweit rund 41,5 Mio. t Abfall gesammelt. Im Jahr 2016 wuchs die weltweite Abfallmenge auf rund 93,5 Mio. t und erzielte einen Wert von etwa 20 Mrd. US-Dollar (Afolabi, 2019, S. 269). Aus Europa werden laut Schätzungen etwa 25-30% des Elektro- und Elektronikschrotts illegal in Länder ohne vernünftige Recyclinginfrastruktur exportiert. Dies führt nicht nur zu Umwelt- und Gesundheitsschäden in den betroffenen Ländern, sondern auch zu einem volkswirtschaftlichen Verlust für Europa (acatech et al., 2017, S. 35). Laut einem Bericht der Zeitung Der Standard (2018) kostet der illegale Müllexport Österreich jährlich 150 Mio. Euro.

Eine mögliche Handlungsoption zur Verbesserung der aktuellen Situation besteht darin, dass Elektro- und Elektronikgeräte zukünftig nur noch an zertifizierte Recyclinganlagen geliefert werden dürfen (Eurometaux, 2016, S. 1). Ebenso könnte eine Erhöhung der Strafen für den illegalen Export von Elektro- und Elektronikgeräten zu einer Verbesserung führen. Außerdem

könnten verbesserte Kontrollmaßnahmen das Problem wirksam bekämpfen (acatech et al., 2017, S. 35).

Recyclingfähiges Produktdesign

Noch heute werden in vielen Teilen der industriellen Welt Materialien in Produkten ohne die Integration von Versorgungsrisiken und Nachhaltigkeitskriterien ausgewählt. Ingenieure und Designer haben im Allgemeinen wenig bis kaum Wissen über die Materialien in den Produkten, wobei dieses Wissen in Bezug auf kritische Materialien noch kleiner ist (Ferro & Bonollo, 2020, S. 29). Je höher der Einsatz von Edel- und Sondermetallen in Produkten ist, desto entscheidender ist es, dass diese Metalle am Ende ihrer Lebenszeit zurückgewonnen werden können. Jedoch sind die Materialverbünde in vielen Elektro- und Elektronikgeräten so komplex, dass man nur schwer an die wertvollen Metalle herankommt (acatech et al., 2017, S. 17).

Ein wesentlicher Grund für den ineffizienten Umgang mit Materialien und Rohstoffen liegt in der fehlenden Informationsbereitstellung über Einsparpotenziale und im mangelnden Bewusstsein über die Ressourcenintensität von Produkten. Konsument/innen und Industrie könnten durch Informationen über Einsparmöglichkeiten einen effizienteren Umgang mit Materialien entwickeln. Mögliche Lösungsansätze zur Verbesserung der aktuellen Situation könnten in der Einführung eines Labels zur Recyclingfähigkeit, vergleichbar mit dem Label zur Energieeffizienz bei Elektrogeräten, sein. Weiters könnten die Beratung von Unternehmen und Haushalten, Pflichten zur Weitergabe von Informationen oder gezielte Informationskampagnen die Situation erheblich verbessern (BMUB, 2016, S. 75).

Auf nationaler wie auch auf europäischer Ebene sollten Normen den Ressourcenschutz verstärkt unterstützen. Durch Normung von Produktgruppen können Ressourcen auf unterschiedliche Weise geschont werden. So kann einerseits die Nutzungsdauer von Produkten erhöht werden, indem z.B. Reparaturmöglichkeiten verbessert werden. Durch eine Normung von Bauweisen kann ebenfalls der Austausch von einzelnen Bauteilen ermöglicht werden. So können Akkus ausgetauscht und Netzteile und Stecker mit einem neuen Gerät weiterverwendet werden. Ebenso kann durch eine Normung die stoffliche Verwertung erhöht werden (BMUB, 2016, S. 54). Die Normung von Bauweisen sollte sich jedoch stets an der technischen Realisierung von Recyclingverfahren orientieren. Durch eine Umsetzung auf nationaler und europäischer Ebene könnte somit ein recyclingverbessertes Produktdesign zur Schaffung einer ökologischen und ökonomischen Kreislaufwirtschaft beitragen (acatech et al., 2017, S. 36).

4.2.2 Diversifizierte Bezugsquellen

Die europäische Industrie ist bei den meisten Metallen zu 75% bis 100% von Importen abhängig (KOM, 2020, S. 6). China ist dabei der größte Produzent von vielen Metallen. Der Trend einer zunehmenden Konzentration hin zu wenigen Rohstoffunternehmen in immer weniger Ländern ist seit einigen Jahren zu sehen. So bestehen bereits jetzt bei einigen Metallen Monopole mit nur noch wenigen alternativen Anbietern (acatech et al., 2017, S. 36).

Im Jahr 2020 stammten

- 57% des weltweit produzierten Aluminiums aus China (vgl. Abschnitt 3.1.1)
- 67,5% des weltweit produzierten Siliziums stammten aus China (vgl. Abschnitt 3.4.1)
- 43% des weltweit produzierten Bleis stammten aus China (vgl. Abschnitt 3.7.1)
- 40% des weltweit produzierten Molybdäns stammten aus China (vgl. Abschnitt 3.10.1)
- 43% des weltweit produzierten Palladiums stammten aus Russland (vgl. Abschnitt 3.11.1)
- 40% des weltweit produzierten Chroms stammten aus Südafrika (vgl. Abschnitt 3.12.1)

Eine Diversifizierung von Bezugsquellen schließt den Abbau von heimischen Ressourcen mit ein. Die Produktion von kritischen Rohstoffen aus primären Quellen ist innerhalb der EU jedoch gering (Melcher, 2014, S. 407). Einzig für Kupfer (Polen und Deutschland), Eisen (Schweden), Silizium (Frankreich und Spanien), Silber (Polen), Blei (Schweden), Zink (Schweden) und Chrom (Finnland) gibt es eine eigene Minenproduktion (vgl. Kapitel 3). In Bezug auf die eigene Versorgungssicherheit und die Entwicklung der weltweiten Marktstrukturen wäre es von hoher Bedeutung, wenn die Importeure von kritischen Rohstoffen ihre Bezugsquellen diversifizieren würden. Jedoch wird meist der preisgünstigste Anbieter von Rohstoffen bevorzugt. Dadurch werden jedoch bestehende Monopolstellungen, wie etwa bei vielen Metallen aus China, verschärft (acatech et al., 2017, S. 36).

Weiters gilt es zu beachten, dass nur wenige Metalle an der Börse gehandelt werden. Die Londoner Metallbörse (LME) ist das Zentrum des internationalen Metallhandels. Aktuell werden dort 11 verschiedene Metalle gehandelt. Darunter fallen die Nichteisen-Metalle wie etwa Aluminium, Kupfer, Blei, Zink, Nickel, Zinn als auch die Edelmetalle wie etwa Gold und Silber und das Nebenmetall Molybdän. Für viele Metalle, die für die Energiewende entscheidend sind, wie etwa Silizium, Lithium, Chrom und Palladium, gibt es keinen in dieser Art einfachen Zugang (London Metal Exchange, 2021). Unternehmen, die mit Rohstoffen arbeiten, die nicht an der LME gehandelt werden, müssen sich Zugangswege für diese Rohstoffe verschaffen. Eine Möglichkeit an diese Rohstoffe zu gelangen, besteht darin, dass Unternehmen wie Technologiekonzerne, Hersteller von Windkraft-, Photovoltaik und Solarthermieranlagen oder deren Zulieferer selbst Bergbau betreiben. Alternativ können jene Unternehmen durch Rückwärtsintegration, also den Kauf von Lieferanten, die Rohstoffe für ihr Unternehmen sichern. Ebenso kann die Sicherstellung der Belieferung durch langfristige Lieferverträge, Vorkaufsrechte oder gemeinsame Joint Ventures erfolgen (acatech et al., 2017, S. 36; Blum et al., 2018, S. 103). Der aktuelle und international anerkannte österreichische Rohstoffplan zielt darauf ab, heimische Rohstoffvorkommen auf ihre Sicherungswürdigkeit zu erfassen und zu evaluieren. Fragen hinsichtlich des Auslandsbergbaus und der Sicherung der Kontrolle wichtiger österreichischer Produzenten werden jedoch nicht behandelt (Weber, 2012). Da in Zukunft mit einem Anstieg der Rohstoffpreise zu rechnen ist und dadurch Versorgungsengpässe entstehen können, kann es aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein, eine staatlich verstärkte Vorsorge zu forcieren. Dies muss insbesondere für Rohstoffe gelten, die für die Energiewende entscheidend sind (acatech et al., 2017, S. 37)

4.2.3 Lagerhaltung

Ein weiterer wesentlicher Punkt zur Reduktion der Versorgungsrisiken liegt in der Lagerhaltung. In der Regel sind die Unternehmen selbst dafür verantwortlich, welche Mengen sie an Rohstoffen über welchen Zeitraum einlagern. Diese Entscheidung wird in Abhängigkeit der aktuellen beziehungsweise zu erwartenden Rohstoffpreise am Weltmarkt getroffen. Hinsichtlich kritischer Rohstoffe kann auch der österreichische Staat ein Interesse daran haben, dass genügend Reserven im Inland gelagert werden. Hierbei gibt es zwei mögliche Strategien, um dies zu bewerkstelligen. Zum einen kann die Industrie durch steuerliche Anreize dazu bewogen werden, mehr Rohstoffe einzulagern. Zum anderen kann der Staat selbst die Lagerung von kritischen Rohstoffen übernehmen (acatech et al., 2017, S. 48).

Eine von Staat und Industrie gemeinsam organisierte Strategie für kritische Rohstoffe gibt es unter anderem in Japan und Südkorea (JOGMEC, 2021; KORES, 2021a). Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) bietet finanzielle Unterstützung in Form von Eigenkapital und Darlehen für Explorationsaktivitäten, Investitionen zum Erwerb von Vermögenswerten und Haftungsgarantien für Entwicklungsfonds. Die finanzielle Unterstützung durch JOGMEC soll japanische Unternehmen beim Erwerb von Rechten und Beteiligungen an Bodenschätzen unterstützen und gleichzeitig eigene Minen entwickeln (JOGMEC, 2021, S. 21). Das japanische Programm „Rare Metals Stockpiling“ legt nationale Reserveziele fest, wonach der Staat Reserven für 42 Tage und die Industrie für 18 Tage einlagern soll (JOGMEC, 2018, S. 27). Das „Rare Metals Stockpiling“ Programm gilt für die Metalle Chrom, Kobalt, Mangan, Molybdän, Nickel, Vanadium und Wolfram (acatech et al., 2017, S. 48). Die Korea Resources Corporation (KORES) stellt privaten Unternehmen Mittel und Technologien zur Ressourcenerschließung im In- und Ausland zur Verfügung. Darüber hinaus lagert die KORES Bodenschätze zur Vorbereitung auf nationale Notfälle ein und entwickelt und vertreibt Technologien zur Erschließung von Rohstoffen mit Mehrwert (KORES, 2021b, S. 5). Die KORES ist für den Einkauf von 8 strategischen Rohstoffen verantwortlich. Dazu zählen Bitumen, Eisenerz, Zink, Kohle, Uran, Kupfer, Nickel und die seltenen Erden (KORES, 2021b, S. 8). Laut acatech et al. (2017, S. 48) könnten diese gemeinsam organisierten Strategien von Industrie und Staat als Subventionen betrachtet werden, wodurch bestimmte Unternehmen profitieren würden. Zudem könnten nach dem Auslaufen der staatlichen Unterstützung zur Lagerhaltung die gelagerten Rohstoffe von den Unternehmen weiterverkauft werden. Dadurch würde die gewünschte Wirkung, nämlich in Hochpreisphasen ausreichend Rohstoffe lagernd zu haben, unwirksam werden.

Eine Alternative zur gemeinsam organisierten Lagerhaltung bietet die zentrale Lagerhaltung durch den Staat. Österreich, bzw. bei einer europäischen Lösung die EU, würde damit eine Rolle im weltweiten Rohstoffgeschäft einnehmen und könnte somit zur nationalen bzw. europäischen Steigerung der Versorgungssicherheit beitragen (acatech et al., 2017, S. 49). Diese Art der nationalen Lagerhaltung kommt unter anderem in den USA zum Einsatz (DLA, 2021). Hierbei müsste eine Strategie ausgearbeitet werden, in der festgelegt ist, an wen die strategischen Metalle im Falle eines nationalen Notfalls vergeben werden. Denkbar wäre eine Vergabe an strategisch essenzielle Industriebetriebe. Nachteile der staatlichen Lagerhaltung ergeben sich daraus, dass der Staat im Vergleich zur Industrie Entscheidungen in Bezug auf den Rohstoffhandel langsamer und ineffizienter umsetzen kann. Ebenso kann durch technologische Weiterentwicklungen der Bedarf an bestimmten Metallen steigen oder sinken. Die Gefahr, dass Metalle eingelagert werden, die aufgrund technologischem Wandels

nicht mehr gebraucht werden, ist beim Staat größer als bei Unternehmen, da Unternehmen ihren eigenen zukünftigen Bedarf besser einschätzen können. Zudem könnte die staatliche Vorsorge mit Metallen die Vorsorge in der Privatwirtschaft verringern, wodurch der Effekt der Lagerhaltung geschmälert wäre (acatech et al., 2017, S. 49).

Es stellt sich die Frage, ob eine staatlich unterstützte Lagerhaltung aus volkswirtschaftlicher Sicht Sinn macht. Es sei zunächst darauf hingewiesen, dass stark volatile Rohstoffpreise nicht die Folge von Marktversagen sind, sondern eine hohe Unsicherheit bei der Preisfindung bedeuten. Somit würde eine staatliche Lagerhaltung kein Marktversagen korrigieren, sondern einen Mechanismus zur Preisglättung in Hochpreisphasen darstellen. Da eine unmittelbar bevorstehende Versorgungskrise laut der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften nicht absehbar ist, kann gefolgert werden, dass die gesellschaftlichen Kosten den Nutzen einer staatlichen Lagerhaltung aktuell noch übersteigen (acatech et al., 2017, S. 50).

Kommt es jedoch in Folge von Exportverboten oder anderer gesetzlicher Regulierungen zu physischen Lieferengpässen, muss die Situation neu bewertet werden. In Zeiten von engen Lieferketten („Just in Time Delivery“) sind die eigenen Reserven schnell verbraucht. Durch den daraus resultierenden Produktionsstopp können hohe volkswirtschaftliche Kosten entstehen, welche wiederum durch staatliche Eingriffe gesenkt werden können. Außerdem können, um Lieferengpässe zu vermeiden, bi- und multilaterale Verträge und Handelsabkommen entwickelt werden. Diese stellen vor allem mit Sanktionsmechanismen einen kosteneffizienten und effektiven rechtlichen Rahmen her, um politisch induzierte Lieferengpässe zu vermeiden (acatech et al., 2017, S. 50). Ein reales Beispiel zur Vermeidung von Lieferengpässen stellt die Covid-19 Pandemie dar. In einer akuten Bedrohungs- und Krisensituation kam es trotz gemeinsamer europäischer Beschaffungsstrategie von persönlicher Schutzausrüstung (z.B. Schutzmasken) immer wieder zu kurzfristigen Lieferengpässen in Österreich. Eine gänzliche Vermeidung von Lieferengpässen konnte aufgrund der rasant wachsenden Nachfrage, welche unter anderem durch gesetzliche Regulierungen in Form einer Tragepflicht von Schutzmasken gestärkt wurde, also nicht erreicht werden.

4.3 Ressourceneffizienz

Weltweit wächst die Nachfrage nach metallischen Rohstoffen (OECD, 2019, S. 4). Dadurch kommt es zum Anstieg der Preise für Rohstoffe, die besonders jene Länder trifft, die eine hohe Importabhängigkeit aufweisen. Steigende Rohstoffpreise entstehen jedoch auch durch Abhängigkeiten von Rohstoffländern, die Monopole auf seltene Rohstoffe haben oder restriktive Exportpolitiken verfolgen. In Österreich werden zum Teil deutlich mehr Ressourcen verbraucht, als durch Abbauprozesse entnommen werden. Eine verbesserte Ressourceneffizienz kann daher helfen, Kosten- und Wettbewerbsvorteile zu erhöhen und so die Rohstoffvorsorge für Österreich zu sichern (Manstein & Tertschnig, 2012, S. 18). Eine ressourceneffiziente Rohstoffgewinnung kann außerdem dazu beitragen, den Energie- und Wasserverbrauch als auch die damit einhergehenden Umweltfolgen zu reduzieren (acatech et al., 2017, S. 51; Manstein & Tertschnig, 2012, S. 17).

4.3.1 Gewinnung von Rohstoffen

Normalerweise werden zunächst jene Lagerstätten zur Gewinnung von Rohstoffen genutzt, aus denen sich die Rohstoffe am einfachsten und kostengünstigsten gewinnen lassen. Im Laufe der Explorationsarbeiten nehmen die Metallgehalte ab und die Erze werden in ihrer Zusammensetzung komplexer. Um den steigenden Bedarf für Metalle auch in Zukunft decken zu können, müssen die technologischen Verfahren für den Abbau der Erze kontinuierlich verbessert werden. Dadurch können einerseits schwer zugängliche Lagerstätten erschlossen werden (z.B.: marine Rohstoffe), andererseits kann man so den steigenden Kosten durch den Abbau der Erze entgegenwirken (acatech et al., 2017, S. 51). Aufgrund technologischer Entwicklungen konnten die Rohstoffpreise im Bereich Exploration und Förderung in den letzten Jahrzehnten konstant gehalten werden (Angerer et al., 2016, S. 120). Zudem wirken sich technologische Weiterentwicklungen positiv auf die Umweltbelastung aus, denn je komplexer die Erze in ihrer Struktur sind, desto höher ist der damit einhergehende Energieaufwand, um diese abzubauen. So werden etwa 8% des weltweiten Energiebedarfs beziehungsweise CO₂-Ausstoßes auf den Bergbau zurückgeführt. Zwar ist dies kostenseitig bei entsprechendem Anstieg der Rohstoffpreise zu verkraften, jedoch steigt dadurch der Eigenenergieverbrauch der Erzeugung von erneuerbaren Energietechnologien, die aus den Metallen hergestellt werden, durch erhöhten Energieaufwand am Anfang der Produktionskette an (Angerer et al., 2016, S. 89). Weiters muss im Sinne eines nachhaltigen Bergbaus dafür Sorge getragen werden, dass sich nach Beendigung des Bergbaubetriebs wieder intakte Ökosysteme entwickeln können. Ebenso muss dies ein Ziel bei bereits stillgelegten Bergwerken sein, bei denen dies in der Vergangenheit nicht geschehen ist. Das kann wiederum zu einer erhöhten gesellschaftlichen Zustimmung für Bergbauprojekte führen (acatech et al., 2017, S. 52). Da die in Abbildung 14 identifizierten Metalle außerhalb Österreichs abgebaut werden, betreffen die durch den Abbau entstehenden Umweltfolgen andere Länder. Dadurch reduziert sich der ökologische Nutzen der in Österreich installierten erneuerbaren Energieanlagen.

Es existieren mehrere Handlungsoptionen, um die oben beschriebenen Probleme im Zusammenhang mit dem Abbau von metallischen Rohstoffen zu verbessern. Um die Gewinnung der Rohstoffe kosteneffizienter und umweltschonender zu gestalten, muss die Forschung und Entwicklung für effizientere Technologien gefördert werden. Weiters muss die Politik dazu beitragen, dass effiziente Abbautechnologien auch weltweit eingesetzt werden. Dadurch können die ökologisch schlechten Folgen des Bergbaus reduziert werden. Außerdem kann die Robotisierung im Bergbau verstärkt forciert werden. Dadurch können nicht nur Kosten eingespart werden, sondern auch Lagerstätten erschlossen werden, die für menschliche Aktivitäten zu gefährlich wären. Auch der Verbrauch von Süßwasser kann vermindert werden, indem Salz- oder Brackwasser verwendet wird. Zudem ließe sich die Klimabilanz von Bergbauunternehmen verbessern, indem die Produktion in Abhängigkeit des Angebots von Strom aus erneuerbaren Energieanlagen angepasst werden würde. So könnten Bergbauunternehmen preisgünstigen erneuerbaren Strom nutzen, um Erze mit hoher Komplexität abzubauen (acatech et al., 2017, S. 52).

4.3.2 Industrie und Endverbraucher

Die Ressourceneffizienz kann sowohl innerhalb der Industrie als auch bei den Endverbrauchern erhöht werden. In der Industrie kann die Nutzung der Rohstoffe durch unterschiedliche Produktionsverfahren beeinflusst werden. Endverbraucher beeinflussen wiederum durch ihre Kaufentscheidungen die Nachfrage nach bestimmten Geräten (acatech et al., 2017, S. 53).

Maßnahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz innerhalb der Industrie beziehen sich in erster Linie auf jene zur Erhöhung der Materialeffizienz als auch zur Substitution (acatech et al., 2017, S. 53). Materialeffizienz bedeutet die Bereitstellung von Materialleistungen mit weniger Materialeinsatz in Produktion und Verarbeitung (Allwood et al., 2011, S. 362). Bei der Substitution wird ein Material oder Element durch ein anderes ersetzt (Materialsubstitution) (Farag, 2008, S. 374). Die häufigsten Gründe für eine Substitution von Materialien sind: Verbesserung der Produktleistung, Erfüllung neuer gesetzlicher Anforderungen, Kostensenkung und Umweltaspekte (Jahan et al., 2016, S. 19).

Der Umgang mit Rohstoffen durch die Endverbraucher ist ein gesellschaftliches Thema. Da jeder Endverbraucher zahlreiche Elektro- und Elektronikgeräte benutzt, werden viele metallische Rohstoffe benötigt. Fest steht, dass die Nutzungsdauer von Elektrogeräten immer kürzer wird (acatech et al., 2017, S. 53; Allwood et al., 2011, S. 368). Dieser Effekt wird nicht nur durch Werbung, sondern auch durch eine Produktionskultur verstärkt, die den nutzungs- und altersbedingten Wertverlust von Produkten gezielt beeinflusst. Für diese Strategien der Lebens- und Nutzungsdauerverkürzung hat sich der Begriff der geplanten Obsoleszenz etabliert. Das Phänomen der künstlichen Produktalterung ist jedoch sehr komplex, weshalb es viele Aspekte gibt, die berücksichtigt werden müssen, um Handlungsempfehlungen umzusetzen (Hübner, 2013, S. 4). Ein sparsamerer Umgang mit Rohstoffen kann jedoch durch Änderungen des Konsummusters der Endverbraucher erreicht werden. Hierzu zählen ein reduziertes Kaufverhalten, rohstoffeffiziente und gut recycelbare Produkte kaufen, Produkte bis zum Ende ihrer Lebensdauer nutzen und gegebenenfalls reparieren zu lassen (acatech et al., 2017, S. 53–54).

Es gibt mehrere Handlungsoptionen, um die Ressourceneffizienz in der Produktion und Produktgestaltung zu steigern. Jene Handlungsoptionen müssen dabei den gesamten Lebenszyklus berücksichtigen. Maßnahmen zur Verbesserung von Produktionsprozessen werden in Österreich durch die Programme „Ökoprofit“, „EMAS“ (Umweltmanagementsysteme), „Responsible Care“ und „PREPARE“ umgesetzt. Die Umsetzung dieser Programme erfolgt dabei durch Angebote der Bundesländer, Angebote der Wirtschaftskammern oder sonstige Angebote in Form von Förderungen von Beratungen. Dennoch ist eine flächendeckende Beratung bisher nicht gelungen, weshalb weitere Impulse gesetzt werden müssen, sodass Unternehmen jene Beratungsprogramme annehmen. Durch Maßnahmen wie etwa eine verstärkte Öffentlichkeitsarbeit, die Ausbildung geeigneter TrainerInnen und BeraterInnen und die Adaption bestehender Beratungsmodule kann dies gelingen (Manstein & Tertschnig, 2012, S. 22). Verschiedene Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz im Bereich der Produktion und Produktgestaltung wurden bereits im REAP erwähnt. Dazu zählt etwa eine Schwerpunktsetzung der Ressourceneffizienz in der Umweltförderung im Inland (UFI), der Schwerpunkt der Ressourceneffizienz in regionalen

Beratungsprogrammen als auch eine Offensive für Ressourceneffizienz und Umwelttechnologien (Manstein & Tertschnig, 2012, S. 23–24).

Weiters kann die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen durch Substitution reduziert werden. Da viele Umwelttechniken auf dem Einsatz kritischer Rohstoffe basieren, für die sich schon heute strukturelle, geopolitische, gesellschaftliche, ökonomische und ökologische Risiken abzeichnen, werden Effizienz- und Recyclingstrategien nicht ausreichen, um die Kritikalität von kritischen Rohstoffen zu reduzieren. Um den Ausbau von Umwelttechnologien nicht nur in Österreich, sondern weltweit zu gewährleisten, muss die Politik die Substitutionsforschung intensivieren und ein Konzept für die Substitution für kritische Rohstoffe entwickeln und umsetzen (BMUB, 2016, S. 48).

Es gibt mehrere Handlungsoptionen, um ein nachhaltigeres Konsumverhalten zu fördern. Dabei stehen der Politik viele Instrumente zur Verfügung. Hierzu zählen Informationskampagnen, Eingriffe in die Entscheidungsarchitektur, die Beeinflussung von Produktpreisen und ordnungspolitische Maßnahmen wie etwa Verbote und Anordnungen (acatech et al., 2017, S. 54).

Ein „hartes“ Instrument zur effizienten Rohstoffnutzung ist eine Ressourcensteuer. Diese Idee hat sowohl von Seiten der Wissenschaft als auch Politik Unterstützung erfahren. Dabei sollen Energie- und Primärressourcen mit einem gewissen Prozentsatz besteuert werden, wodurch Preise stabilisiert und der Ressourcenverbrauch verringert wird. Dadurch kann die Umwelt entlastet und Anreize für eine fortschrittlichere Kreislaufwirtschaft geschaffen werden. Da Umweltkosten nicht in den Rohstoffpreisen enthalten sind, könnten dadurch die externen Kosten internalisiert werden. Im Vereinigten Königreich, Dänemark und Schweden wurde bereits eine Ressourcensteuer auf primäre Baurohstoffe implementiert. Mit Hilfe weiterer politischer Maßnahmen konnte dadurch dazu beigetragen werden, dass recycelte Baurohstoffe vermehrt verwendet werden (acatech et al., 2017, S. 54).

Nachteile einer Ressourcensteuer ergeben sich aufgrund der Hierarchie der Rohstoffe. In Bezug auf die Energiewende sind Energierohstoffe höher als Massenrohstoffe für die Bauindustrie zu bewerten. Deshalb kann eine Steuer auf Ressourcen dazu führen, dass Gebäude weniger gut isoliert werden, da sich die Gebäudeisolierung in Relation zu den Energieverlusten verteuert. Dies könnte dazu führen, dass Baurohstoffe durch Energierohstoffe substituiert werden. Ob dieser Fall eintreten würde, hängt wiederum von den bestehenden bautechnischen Maßnahmen ab. Weiters spricht gegen eine Ressourcensteuer, dass diese die Gesamtbreite der Preisschwankungen für die Rohstoffpreise berücksichtigen muss, wenn sie zu einer Preisstabilisierung führen soll. Maßnahmen für eine Preisstabilisierung auf dem Rohstoffmarkt, wie etwa für Zinn, sind jedoch bisher fehlgeschlagen. Bisher wurden Durchbrüche bei Materialeinsparungen in Zeiten hoher Kosten für Rohstoffe erzielt. So etwa bei den Seltenen Erden in den Jahren 2010 und 2011. Eine geringe Besteuerung von Ressourcen würde aus diesem Grund vermutlich keinen spürbaren Einspareffekt bedeuten. Wiederum würde eine hohe Steuer in Zeiten hoher Marktpreise die Wirtschaft sehr stark belasten. Zudem müsste eine Ressourcensteuer global geltend gemacht werden, da ansonsten große Nachteile für einzelne Länder entstünden. Aufgrund der unterschiedlichen Interessen zwischen Entwicklungs-, Schwellen- und Industrienationen ist die Einigung auf eine globale Ressourcensteuer zur jetzigen Zeit als sehr unwahrscheinlich einzustufen (acatech et al., 2017, S. 54–55).

4.4 Internationale Rohstoffpolitik

Rohstoffpolitik bezieht sich auf jene Form der Politik, die zur Sicherung der Versorgung der Industrie mit mineralischen Rohstoffen dient (Tiess, 2009, S. 110).

Laut acatech et al. (2017, S. 55) hat internationale Rohstoffpolitik zwei Ziele:

1. Der heimischen rohstoffverbrauchenden Industrie bei der Rohstoffsicherstellung im Ausland zu helfen
2. Die globalen Rahmenbedingungen zu verbessern, indem zugängliche und transparente Märkte geschaffen werden und hohe Umwelt- und Sozialstandards im Bergbau als auch in der Aufbereitung von Rohstoffen gesetzt werden.

Es gibt mehrere Instrumente, um diese Ziele zu erfüllen. Diese setzen auf globaler, bilateraler und multilateraler Ebene an.

4.4.1 Globale Abkommen

Im Sinne einer umwelt- und sozialverträglichen Rohstoffsicherung sind für Österreich als rohstoffimportierendes Land die Zustände außerhalb des eigenen Landes von hoher Bedeutung. Eine weltweite Übereinkunft zum Umgang mit Rohstoffen wäre aus umwelt- und sozialverträglicher Sicht wünschenswert. Bisher konnte sich jedoch eine globale Ressourcenpolitik nicht durchsetzen. Das ist auf die unterschiedlichen Interessen von Unternehmen und Staaten als auch die Abwesenheit einer weltweiten supranationalen Rechtssetzungs- und Kontrollinstanz zurückzuführen. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass es auch in absehbarer Zukunft keine weltweite Ressourcenpolitik geben wird (acatech et al., 2017, S. 56).

Auf EU-Ebene ergibt sich dieselbe Problematik. Auch hier sind die Interessen der Unternehmen und Mitgliedsstaaten zu unterschiedlich. Zwar wurden in den vergangenen Jahren eine gemeinsame Rohstoffstrategie und verschiedene Initiativen und Einzelmaßnahmen beschlossen (vgl. KOM, 2008, 2010, 2011, 2014), jedoch ist eine gemeinsame Rohstoffpolitik zur Sicherung der Rohstoffe in absehbarer Zeit unwahrscheinlich (acatech et al., 2017, S. 56).

Innerhalb der EU-Handelspolitik setzt sich Österreich dafür ein, dass Handelshemmnisse und Wettbewerbsverzerrungen beseitigt werden. Durch das regelbasierte multilaterale Handelssystem und die Welthandelsorganisation (WTO) konnte in den letzten Jahrzehnten durch Rechtssicherheit und Vereinfachungen des Handels auf internationaler Ebene der globale Wohlstand erhöht werden, weshalb diese Institutionen auch in Zukunft unerlässlich sind (Badelt et al., 2018, S. 5). So trug die WTO dazu bei, dass Klageverfahren erfolgreich gegen Chinas diskriminierende Exportpolitiken bei metallischen Rohstoffen eingeleitet wurden (vgl. WTO, 2014). Diese Streitschlichtungsverfahren auf WTO-Ebene dauern jedoch lange an und wirken selbst im Falle eines Erfolgs nur als bescheidenes Absicherungsinstrument bei Rohstoffvorhaben im Ausland. Dennoch verlieren diese multilateralen Abkommen ihre Bedeutung nicht, da sie das Ziel eines langfristigen, weltweit gerechten und nachhaltigen Umgangs mit Rohstoffen zum Ziel haben (acatech et al., 2017, S. 56). Die EU nimmt bei der Weiterentwicklung der WTO eine entscheidende Rolle ein. So soll die EU-Handelspolitik in Form unterschiedlicher Handels- und Investitionsabkommen die

Interessen der EU auf WTO-konformer Weise vorantreiben und den Multilateralismus fördern. Auch internationale Organisationen wie die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) leisten wichtige Beiträge bei der Weiterentwicklung des globalen Handelssystems und müssen daher ebenfalls gestärkt werden (Badelt et al., 2018, S. 5).

4.4.2 Bilaterale Abkommen

Ein weiteres Instrument zur Absicherung der Rohstoffversorgung bilden bilaterale Rohstoffabkommen und Rohstoffpartnerschaften. Bilaterale Abkommen ermöglichen der Industrie den Zugang zu Lagerstätten im Ausland. Ebenso können durch bilaterale Abkommen metallische Rohstoffe in hinreichender Menge und zu bezahlbaren Preisen erworben werden. Im Gegensatz zu multilateralen Abkommen sind bilaterale Abkommen leichter zu verwirklichen und können dadurch zumindest kurz- bis mittelfristig zu schnelleren Erfolgen führen. Da sich bilaterale Rohstoffpartnerschaften für Länder eignen, die gemeinsame Interessen haben, können neben der Stabilisierung der Rohstofflieferbeziehungen auch andere kollektive Ziele verfolgt werden.

Die österreichische Rohstoffstrategie 2030 (BMLRT, 2020) beruht ähnlich der Europäischen Rohstoffinitiative (KOM, 2008) auf 3 Säulen. Die zweite Säule „Nachhaltige Versorgung aus internationalen Zulieferquellen“ hat zum Ziel, den österreichischen Unternehmen einen fairen und diskriminierungsfreien Zugang zu den mineralischen Rohstoffen auf den Weltmärkten zu sichern. Dabei wird angestrebt, dass Österreich eigene bilaterale Rohstoffabkommen mit konkreten Zielländern abschließt (BMLRT, 2020, S. 5). Länder wie die Mongolei waren bereits in Gesprächen mit der österreichischen Regierung über ein bilaterales Rohstoffabkommen (Wiener Zeitung, 2012). Deutschland hat bereits drei bilaterale Rohstoffabkommen (Mongolei, Kasachstan und Peru) als auch eine Kooperationsvereinbarung mit Chile abgeschlossen. Diese Partnerschaften haben zum Ziel, Rohstoffe aus den Partnerländern für die heimische Industrie zu sichern und die Kooperation im Industrie- und Technologiebereich zu stärken. Ebenso nimmt die Entwicklung nachhaltiger Umwelt- und Sozialstandards eine wichtige Rolle ein. Die deutsche Rohstoffpartnerschaft mit der Mongolei zeigt jedoch auch, dass die vertraglichen Vereinbarungen nicht immer problemlos umgesetzt werden. Deutsche Unternehmen konnten bislang keine größeren Investitionen in den mongolischen Bergbau tätigen. Dies hängt unter anderem mit den politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen für ausländische Unternehmen als auch der mangelhaften Infrastruktur in der Mongolei zusammen. Das erschwert wiederum die Förderung und den Handel mit Rohstoffen. Daher werden auch in absehbarer Zukunft keine größeren Investitionen in die mongolische Bergbautätigkeit stattfinden (acatech et al., 2017, S. 57).

Bilaterale Rohstoffabkommen können daher nur ein begleitendes Instrument für die Rohstoffindustrie darstellen. Konkrete Lieferverträge und deren Konditionen müssen die Unternehmen selbst aushandeln. Damit die bilateralen Abkommen Wirkung zeigen, müssen die staatlichen Maßnahmen von der Industrie angenommen werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die heimische Industrie die Fragen der Rohstoffsicherung aktiv mitgestaltet. Außerdem müssen die bilateralen Abkommen an die Bedürfnisse der Industrie angepasst sein (acatech et al., 2017, S. 57).

4.4.3 Zentraler Ansprechpartner für Rohstofffragen

Laut acatech (2017, S. 57) wäre ein zentraler Ansprechpartner für Rohstofffragen eine Option, um Rohstofffragen zwischen Politik und Wirtschaft in Zukunft verstärkt zu forcieren. So wäre die Etablierung des Postens eines Staatssekretärs beziehungsweise einer Staatssekretärin für Rohstofffragen denkbar. Diese zentrale Ansprechperson für Rohstofffragen könnte die unterschiedlichen politischen Zuständigkeitsebenen zusammenführen und die Interessen der österreichischen Regierung im Ausland verstärkt vertreten. Zudem könnte die Ansprechperson auf eine engere Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und zivilgesellschaftlichen Organisationen hinwirken, um so rohstoffstrategische, aber auch Umwelt- und Sozialfragen enger abzustimmen. Ebenso könnte dadurch die Kommunikation auf EU-Ebene gestärkt werden, wodurch die Mitgliedsstaaten enger kooperieren.

4.4.4 Verbindliche Transparenzmechanismen

Viele Rohstoffe sind weltweit durch intransparente Produktions- und Lieferketten charakterisiert. Vor allem in politisch instabilen Ländern, in denen bewaffnete Gruppen vom Rohstoffgeschäft profitieren, ist es schwierig nachzuvollziehen, woher die Rohstoffe stammen und wie ihre Verarbeitung stattfindet. Unternehmen, die ihre Rohstoffe aus politisch instabilen Ländern beziehen, unterstützen somit indirekt korrupte Gruppen und Regierungen. Die Leidtragenden sind wiederum die lokale Bevölkerung und die Umwelt (acatech et al., 2017, S. 58).

Um die oben beschriebene Problematik einzudämmen sind verbindliche Transparenzmechanismen ein geeignetes politisches Mittel. In den letzten Jahren hat es weltweit bereits einige Initiativen gegeben, die mehrere metallische Rohstoffe betreffen und auf unterschiedlicher Ebene ansetzen (acatech et al., 2017, S. 58). Hierzu zählen der *International Council of Mining & Metals*, die *Extractive Industries Transparency Initiative (EITI)*, das *Kimberley Process Certification Scheme for diamonds (KPCS)*, das *Conflict-Free Sourcing Initiative/Conflict-Free Smelter Program*, der *Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act* (kurz: *Dodd-Frank Act*), die *Aluminium Stewardship Initiative (ASI)* und die *EU-Verordnung zur Festlegung von Pflichten zur Erfüllung der Sorgfaltspflichten in der Lieferkette für Unionseinführer von Zinn, Tantal, Wolfram, deren Erzen und Gold aus Konflikt- und Hochrisikogebieten*. Von diesen Initiativen sticht der Kimberley-Prozess in zweierlei Hinsicht hervor: Seine Verhandlung und Umsetzung verlief überraschend schnell und wurde trotz seines komplizierten Designs und seiner relativen Strenge weitgehend akzeptiert. Außerdem wurde seine Implementierung mit einem Rückgang der Gewalt in Verbindung gebracht, obwohl er in den letzten Jahren zunehmend in die Kritik geraten ist (acatech et al., 2017, S. 59; Haufler, 2010, S. 403).

Der bedeutendste Transparenzmechanismus bei den metallischen Rohstoffen ist der im Jahr 2010 in den USA verabschiedete *Dodd-Frank Act* (acatech et al., 2017, S. 58). In Sektion 1502 wird angeführt, dass Unternehmen, die an der US-Börse notiert sind, jährlich darüber berichten müssen, ob ihre Produkte Konfliktmineralien – hauptsächlich mit Zinn, Tantal, Wolfram und Gold („3TG“) - aus der Demokratischen Republik Kongo und den Nachbarländern enthalten (Dranginis, 2016, S. 1). Ziel dieses Transparenzmechanismus ist es, Unternehmen dazu zu bewegen, mehr Verantwortung im Rohstoffhandel zu übernehmen. Aufgrund eines möglichen Reputationsverlustes für Unternehmen soll auf diese Weise verhindert werden, dass aus den Konfliktgebieten Rohstoffe bezogen werden (acatech et al.,

2017, S. 58). Der Dodd-Frank Act führte zu einer erhöhten Sicherheit der Bevölkerung in einigen Bergbaugebieten, zu einer deutlichen Reduzierung der Kontrolle durch bewaffnete Gruppen in 3TG-Bergbauregionen, zu verbesserten Gesundheitsstandards für Bergbauleute, zu einer organisierten lokalen Lobbyarbeit zur Unterstützung von Reformen, Entwicklungsinitiativen in der Region und zur Implementierung eines Systems, um Mineralien als konfliktfrei zu zertifizieren (Dranginis, 2016, S. 1). Jedoch wurden auch einige Probleme im Zusammenhang mit dem Dodd-Frank Act festgestellt. So wird von Kritikern des Gesetzes behauptet, dass der Dodd-Frank-Act teilweise sogar kontraproduktiv wirkt, da Unternehmen weniger Rohstoffe aus der Demokratischen Republik Kongo bezogen, aus Angst vor einem Reputationsverlust. Dadurch hätten zahlreiche Kongolesen ihre Arbeitsplätze im Bergbau verloren. Zudem wird eine mangelhafte Dokumentation der Unternehmen über die Herkunft der Rohstoffe in ihren Produkten kritisiert (acatech et al., 2017, S. 58).

5. Ergebnisse

Hinsichtlich des Bedarfs für kritische Rohstoffe zeigen sich in dieser Arbeit die Solarthermie, die Photovoltaik und die Windkraft als relevante erneuerbare Energietechnologien. Um den Bedarf an kritischen Rohstoffen in diesen Technologien darzustellen, wurde die Marktsituation in Österreich näher untersucht und ein Marktmix aus den eingesetzten Technologien erstellt. Mithilfe von Ökobilanzierungen (Life Cycle Assessment – LCA) wurden jene Materialien erfasst, die in den Energietechnologien verbaut sind.

Um den Ausbau der STA, PVA und WKA in Österreich auch in Zukunft zu ermöglichen, wird eine Vielzahl von Metallen benötigt. 13 Metalle wurden in diesen Anlagen als kritisch eingestuft. Tabelle 19 zeigt, welche kritischen Metalle in diesen erneuerbaren Energieanlagen in Österreich verbaut sind:

Tabelle 19: Kritische Elemente in den erneuerbaren Energieanlagen Österreichs

Energietechnologie	Rohstoff
Solarthermie	Aluminium Kupfer Chrom Eisen
Photovoltaik	Aluminium Silizium Kupfer Zinn Silber Blei Eisen Zink Gold Molybdän Palladium Chrom Mangan
Windkraft	Aluminium Kupfer Eisen Silizium Molybdän Mangan Chrom

Die bedeutendsten Länder für die weltweite Produktion der identifizierten kritischen Rohstoffe sind Australien, China, Brasilien, Indien, Russland, Südafrika, Kanada und USA. Etwa 90% der weltweiten Bergbauproduktion befindet sich in diesen acht Ländern. China hat hierbei die diversifizierte Bergwerksproduktion. So nahm China im Jahr 2020 die führende Rolle bei der Produktion von Aluminium, Kupfer, Silizium, Zink, Zinn, Blei, Gold und Molybdän ein. Die bedeutendsten Länder für die weltweiten Reserven der identifizierten

Rohstoffe sind Australien, Brasilien, Russland, China, Guinea, Indien und Vietnam. Etwa 85% der weltweiten Reserven befinden sich in diesen sieben Ländern.

Aus geologischer Sicht sind genügend metallische Rohstoffe vorhanden, um die Energiewende in Österreich bis 2040 zu schaffen. Angesichts des 0,1-Prozent Kriteriums und der erwartbaren erheblichen Konkurrenzsituation durch die Nachfrage anderer Technologien ist der Bedarf für 8 dieser Rohstoffe (Aluminium, Kupfer, Eisen, Silizium, Silber, Molybdän, Chrom und Mangan) möglicherweise als kritisch einzuschätzen. Zudem sei darauf hingewiesen, dass die Energiewende bis zum Jahr 2040 gewiss nicht beendet sein wird, sondern darüber hinaus weiter gehen muss.

Ebenso gibt es eine hohe Abhängigkeit von ausländischen Rohstoffanbietern, wodurch eine dauerhafte Verfügbarkeit dieser Rohstoffe zu bezahlbaren Preisen nicht garantiert ist. Österreich ist bei den meisten der als kritisch identifizierten Metalle von Importen abhängig. Blei und Kupfer bilden hierbei eine Ausnahme. Deren Produktion erfolgt vollständig auf Basis von Sekundärmaterial. Politik und Industrie können jedoch Maßnahmen ergreifen, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Im Folgenden werden die möglichen Handlungsoptionen für Österreich zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 20: Handlungsoptionen für einen verbesserten Umgang mit kritischen Metallen

Handlungsoption	Ziel
4.1 Expertise und Wissenstransfer	
Entwicklung eines modernen Lagerstättengesetzes, das zur Offenlegungspflicht für geologische Daten führt	Gemeinsame Entwicklung neuer Explorationswege und Konzepte durch Wissenschaft und Industrie
Europäisches Wissensnetzwerk für Rohstoffe stärken. Beispielsweise Minerals Intelligence Network for Europe unterstützen	Bereitstellung von verbesserten Informationen für Politik und Industrie
Stärkung des EuroGeoSurveys (EGS) auf EU-Ebene	Bereitstellung von verbesserten Informationen für Politik und Industrie
Metallmärkte ähnlich den International Metal Study Groups und dem ERECON Network transparenter gestalten und für weitere Metalle Arbeitsgruppen gründen	Bereitstellung von Informationen für Politik und Industrie
4.2 Versorgungssicherheit	
Weitergabe von Informationen über Rohstoffe in Produktgruppen zwischen Produzenten und Entsorger	Verbesserte Recyclingstandards, Rückgewinnung von Metallen und Informationsweitergabe zwischen Produzenten und Entsorger
Europaweite Umsetzung verbindlicher technischer Recyclingstandards für ressourcenrelevante Produktgruppen	Effizientes Recyclingsystem nach dem aktuellen Stand der Technik, Rückgewinnung von Metallen
Verbraucherfreundliche Gestaltung der Sammelsysteme	Erhöhte Rückgewinnung von Metallen
Pfandsysteme oder Leasingmodelle für Elektro-Altgeräte entwickeln	Erhöhte Recyclingquote und damit einhergehende erhöhte Metallrückgewinnung
Elektro-Schrott nur noch an zertifizierte Recyclinganlagen liefern	Illegalen Elektro-Schrott Export verhindern
Verbesserte Kontrollmaßnahmen und Erhöhung der Strafen für Elektro-Schrott Exporte	Illegalen Elektro-Schrott Export verhindern
Einführung eines Labels zur Recyclingfähigkeit	Ressourceneffizienz erhöhen
Normung von Produktgruppen auf nationaler als auch europäischer Ebene	Erhöhte Nutzungsdauer von Produkten und Erhöhung der stofflichen Verwertung
Anreize zur Lagerhaltung für kritische Rohstoffe in der Industrie schaffen	Versorgungsengpässe reduzieren
Staatliche Lagerhaltung für kritische Rohstoffe schaffen	Versorgungsengpässe reduzieren

Handlungsoption	Ziel
4.3 Ressourceneffizienz	
Förderung von Forschung und Entwicklung hinsichtlich effizienter Abbautechnologien im Bergbausektor	Kosteneffiziente und umweltschonende Gewinnung von Rohstoffen
Verstärkte Öffentlichkeitsarbeit, Ausbildung geeigneter TrainerInnen und BeraterInnen und die Adaption bestehender Beratungsmodule	Ressourceneffizienz in der Produktion und in der Produktgestaltung erhöhen
Förderung der Substitutionsforschung	Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen reduzieren, Ausbau der Umwelttechnologien weltweit gewährleisten
Einführung einer Ressourcensteuer	Stabilisierung der Rohstoffpreise, Verringerung des Ressourcenverbrauchs, Entlastung der Umwelt und Schaffung von Anreizen für eine fortschrittlichere Kreislaufwirtschaft
4.4 Internationale Rohstoffpolitik	
Etablierung einer weltweiten supranationalen Rechtssetzungs- und Kontrollinstanz für Ressourcen	Erhöhung und Angleichung weltweiter Umwelt- und Sozialstandards
Bilaterale Rohstoffabkommen und Rohstoffpartnerschaften schließen	Stabilisierung der Rohstofflieferbeziehungen als auch anderer kollektiver Ziele
Etablierung eines zentralen Ansprechpostens für Rohstofffragen in Österreich	Verstärkte Vertretung der österreichischen Interessen im Ausland, Hinwirkung zu einer engeren Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und zivilgesellschaftlichen Organisationen, verstärkte Kommunikation auf EU-Ebene und engere Kooperation mit Mitgliedsstaaten
Verbindliche Transparenzmechanismen in Rohstofflieferketten einführen	Erhöhte Umwelt- und Sozialstandards etablieren, Finanzierung bewaffneter Gruppen verhindern

6. Schlussfolgerung

In dieser Masterarbeit wird dargestellt, welche kritischen Rohstoffe in welchen Mengen in den Photovoltaik-, Windkraft- und Solarthermieranlagen Österreichs verbaut sind und welche Handlungsoptionen Österreich hat, um den Umgang mit kritischen Rohstoffen in Zukunft nachhaltiger und effizienter zu gestalten.

In einem ersten Teil wurde eine Metaanalyse durchgeführt, um den Einsatz kritischer mineralischer Ressourcen einschätzen zu können. Hierbei wurden 10 internationale Studien berücksichtigt, die im Zeitraum von 2015 bis 2020 veröffentlicht wurden. Dabei wurde analysiert, welche Elemente in den einzelnen Studien als kritisch eingestuft werden.

Auf Basis der Literaturrecherche kann gefolgert werden, dass es keinen wissenschaftlichen Konsens zu der Kritikalität der Elemente gibt. Studienergebnisse deuten darauf hin, dass einige Rohstoffe gefährdet sein könnten, jedoch gibt es bereits Ansätze, die den Einsatz von Marktmechanismen als potenzielle Problemlösung verstehen. Außerdem sind Resultate zur Kritikalität von Rohstoffen aufgrund der unterschiedlichen Methodik und verwendeten Definitionen schwer vergleichbar. Ebenso können diese auch falsch sein und die Versorgung mit bestimmten Rohstoffen fälschlicherweise als sicher eingestuft werden.

Trotz unterschiedlicher Methoden bei der Durchführung der Kritikalitätsstudien gibt es bei den am häufigsten untersuchten Elementen übereinstimmende Ergebnisse in Bezug auf die Kritikalität. So sind sich die Autoren der Kritikalitätsstudien darüber einig, dass die Seltenen Erden, die Platinmetalle und Indium zu den kritischsten Elementen zählen. Jedoch wurden nicht alle Elemente mit derselben Häufigkeit untersucht. Das kann darauf hinweisen, dass die Autoren der Studien bei den untersuchten Elementen von einem bestimmten Referenzrahmen ausgegangen sind, wodurch bestimmte Elemente in ihrer Studie nicht berücksichtigt wurden. Es zeigt sich also, dass die Methodik zur Evaluierung der Kritikalität von Rohstoffen nicht ausgereift ist. Weiters sei nochmal darauf hingewiesen, dass das Konzept der Kritikalität sehr komplex und die Nutzer der Informationen zu unterschiedlich sind, als dass Metalle einfach als „kritisch“ oder „nicht kritisch“ bezeichnet werden können. Unternehmen, nationale Regierungen und Experten für die Nachhaltigkeit von Ressourcen haben unterschiedliche Ziele, Perspektiven und Zeithorizonte, weshalb allgemeingültige Kritikalitätsbewertungen zwar informativ und nützlich sein können, jedoch niemals verbindlich.

In den Photovoltaik-, Windkraft- und Solarthermieranlagen Österreichs sind 13 kritische Elemente verbaut. Hierzu zählen Aluminium, Kupfer, Eisen, Silizium, Zinn, Silber, Blei, Zink, Gold, Molybdän, Palladium, Chrom und Mangan. Aus geologischer Sicht sind diese Metalle zwar in ausreichender Menge vorhanden, um die prognostizierten Bedarfe an kritischen Rohstoffen bis zum Jahr 2040 in Österreich zu decken, jedoch ist Österreich bei den meisten dieser Rohstoffe, mit Ausnahme von Blei und Kupfer, vollständig von Importen abhängig. Dadurch ist ein dauerhafter Zugang zu diesen Rohstoffen auf den Weltmärkten zu bezahlbaren Preisen nicht garantiert. Hier müssen Politik und Industrie ansetzen und Maßnahmen ergreifen, um die Versorgungssicherheit auch in Zukunft zu gewährleisten.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Handlungsoptionen zu einem verbesserten Umgang mit kritischen Rohstoffen in Österreich beziehen sich auf Maßnahmen im Bereich Expertise und Wissenstransfer, Versorgungssicherheit, Ressourceneffizienz und Internationale Rohstoffpolitik. Innerhalb dieser Bereiche wurden mehrere Handlungsoptionen vorgestellt.

Diese zielen darauf ab, die Importabhängigkeit zu reduzieren oder Importe aus dem Ausland langfristig zu sichern.

Eine Möglichkeit, um dies zu erreichen, besteht in der Bereitstellung von verbesserten Informationen für Politik und Industrie. Auf österreichischer Ebene stellt die Entwicklung eines modernen Lagerstättengesetzes, das zur Offenlegungspflicht für geologische Daten führt, eine Option für Wissenschaft und Industrie dar, um neue Explorationswege und Konzepte zu entwickeln. Auf europäischer Ebene könnte das Wissensnetzwerk für Rohstoffe gestärkt werden, indem Projekte wie etwa das Minerals Intelligence Network for Europe (Minerals4EU) oder auch das EuroGeoSurvey (EGS) unterstützt werden. Ebenso sollten die Metallmärkte ähnlich den International Metal Study Groups und dem ERECON Network transparenter gestaltet und für weitere Metalle Arbeitsgruppen gegründet werden.

Im Bereich der Versorgungssicherheit und der Ressourceneffizienz sollte der Fokus der österreichischen Regierung auf Effizienz- und Recyclingstrategien liegen. Bereits bei der Produktentwicklung sollten diese Strategien verstärkt implementiert werden, wobei auf kritische Rohstoffe verzichtet und Produkte recyclinggerecht hergestellt werden sollten. Die Weitergabe von Informationen über Rohstoffe in Produktgruppen zwischen Produzenten und Entsorger kann hierbei einen entscheidenden Faktor darstellen. Jedoch müssten geeignete Erfassungssysteme erst entwickelt werden. Ein weiterer Lösungsansatz zur Verbesserung der aktuellen Situation besteht in der europaweiten Umsetzung verbindlicher technischer Recyclingstandards für ressourcenrelevante Produktgruppen. Hierbei sollten neben den Kriterien der Recyclingprozesse auch wirtschaftliche, ökologische als auch soziale Aspekte mit einfließen. Da jedes Recyclingverfahren jedoch mit Materialverlusten und einem hohen Energieeinsatz verbunden ist, können ebenso Strategien zur Verlängerung der Nutzung- und Lebensdauer von Produkten entwickelt werden.

Als rohstoffimportierendes Land sind für Österreich die internationalen politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen von hoher Bedeutung. Im Bereich der Rohstoffpolitik würde die Etablierung einer weltweiten supranationalen Rechtssetzungs- und Kontrollinstanz für Ressourcen aus umwelt- und sozialverträglicher Sicht eine wünschenswerte Entwicklung darstellen. Aufgrund der unterschiedlichen Interessen von Unternehmen und Staaten ist jedoch davon auszugehen, dass es auch in Zukunft keine weltweite Ressourcenpolitik geben wird. Um die Rohstofflieferbeziehungen Österreichs zu stabilisieren, können bilaterale Rohstoffabkommen und Partnerschaften abgeschlossen werden. Hierbei kann ein zentraler Ansprechpartner für Rohstofffragen in Österreich dafür sorgen, dass die österreichischen Interessen im Ausland vertreten werden und es zu einer engeren Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und zivilgesellschaftlichen Organisationen kommt.

In dieser Arbeit wurden die kritischen mineralischen Rohstoffe in den Photovoltaik-, Windkraft und Solarthermieranlagen Österreichs untersucht. Um ein vollständigeres Bild zu erhalten, bedarf es jedoch weiterer Analysen, die den zukünftigen Ressourcenbedarf in Folge der Energiewende berücksichtigen (z.B. Elektromobilität). Künftige Arbeiten könnten weiters Aufschluss über die ökologischen und sozioökonomischen Folgen des Ressourcenabbaus geben.

7. Literaturverzeichnis

- acatech, Leopoldina, & Akademienunion. (2017). *Rohstoffe für die Energiewende: Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung, S. 108). acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
- Afolabi, O. (2019). WWW: WHAT E-WASTES WORTH. *Academic Journal of Science*, 267–274. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34113.30560>
- Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., & Worrell, E. (2011). Material efficiency: A white paper. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 362–381. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.002>
- Angerer, G., Buchholz, P., Gutzmer, J., Hagelüken, C., Herzig, P. M., Littke, R., Thauer, R. K., & Wellmer, F.-W. (2016). *Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft: Geologie - Märkte - Umwelteinflüsse* (Energiesysteme der Zukunft, S. 202).
- Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., & Marwede, M. (2009). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage* (Innovationspotenziale, S. 404). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Badelt, C., Hölzl, W., Wolfmayr, Y., & Badinger, H. (2018). *Außenwirtschaftsstrategie—Eine innovative Außenwirtschaftspolitik für ein erfolgreiches Österreich* (S. 56). Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, Bundesministerium für Europa, Integration und Äußeres, Wirtschaftskammer Österreich.
- Benedek, L., Luidold, S., Schnideritsch, H., & Antrekowitsch, H. (2014). Recyclingkonzepte für Photovoltaikmodule. *Recycling und Rohstoffe*, 7, 231–250.
- Biermayr, P., Dißauer, C., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Fürnsinn, B., Jaksch-Fliegenschnee, M., Leonhartsberger, K., Moidl, S., Prem, E., Schmidl, C., Strasser, C., Weiß, W., Wittmann, M., Wonisch, P., & Wopienka, E. (2019). *Innovative Energietechnologien in Österreich—Marktentwicklung 2019* (Berichte aus Energie- und Umweltforschung, S. 266). Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).
- Blengini, G. A., Latunussa, C. E. L., Eynard, U., Torres de Matos, C., Wittmer, D., Georgitzkis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Mathieux, F., & Pennington, D. (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020)—Final Report* (S. 158). Europäische Kommission.

- Blum, U., Gleißner, W., Nothnagel, P., & Veltins, M. A. (Hrsg.). (2018). *Vade Mecum für Unternehmenskäufe*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-20755-7>
- BMK. (2020). *Energie in Österreich. Zahlen, Daten, Fakten*. (Energie in Österreich, S. 48) [Report]. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- BMLRT. (2020). *Exzerpt zum Basispapier für eine Österreichische Rohstoffstrategie 2030* (S. 8). Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.
- BMUB. (2016). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen* (S. 144). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Brown, T. J., Idoine, N. E., Wrighton, C. E., Raycraft, E. R., Hobbs, S. F., Shaw, R. A., Kresse, C., Deady, E. A., & Bide, T. (2020). *World Mineral Production 2014–18* (S. 101). British Geological Survey.
- Budd, G. (1999). *Resources and Production of Aluminium*. Resources and Production of Aluminium, Birmingham.
- Cichy, M. (2017). *Kritische mineralische Ressourcen von Photovoltaik-Dünnschicht-Technologien* [Masterarbeit]. Universität für Bodenkultur Wien.
- Der Standard. (2018). *Illegaler Müllexport kostet Österreich 150 Millionen im Jahr*. DER STANDARD. <https://www.derstandard.at/story/2000074362546/illegaler-muellexport-kostet-oesterreich-150-millionen-im-jahr>
- DLA. (2021). *About DLA* [Corporate Website]. History of DLA - Defense Logistics Agency. <https://www.dla.mil/AboutDLA/>
- Dranginis, H. (2016). *Point of Origin—Status Report on the Impact of Dodd-Frank 1502 in Congo* (S. 29) [Report]. enough.
- E-Control. (2020). *Engpassleistung nach Kraftwerkstypen zum 31. Dezember 2019* [Corporate Website]. Bestandsstatistik - www.e-control.at. <https://www.e-control.at/statistik/strom/bestandsstatistik>
- EGS. (2021). *About us* [Corporate Website]. About us - EuroGeoSurveys. <https://www.eurogeosurveys.org/about-us/>

- Einsiedler, D. (2017). *End of Life Wege von Windkraftanlagen in Österreich: Herausforderungen und Chancen beim Recycling* [Masterarbeit]. Universität für Bodenkultur Wien.
- Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH. (2019). *Tätigkeitsbericht 2019* (Tätigkeitsbericht, S. 94) [Report]. Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH.
- Eurometaux. (2016). *EU Circular Economy Package – Overall Recommendations* (S. 2) [Report]. European Association of Metals.
- Eurostat. (2020). *Renewable energy statistics—Statistics Explained* [Corporate Website]. Renewable energy statistics - European Commission. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
- Evangelisti, L., De Lieto Vollaro, R., & Asdrubali, F. (2019). Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>
- Farag, M. M. (2008). Quantitative methods of materials substitution: Application to automotive components. *Materials & Design*, 29(2), 374–380. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.028>
- Ferro, P., & Bonollo, F. (2020). How to apply mitigating actions against critical raw materials issues in mechanical design. *Procedia Structural Integrity*, 26, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.005>
- Fischer, L., & Leonhartsberger, K. (2019). *Marktentwicklung von PV-Heimspeichersystemen in Österreich* (S. 8). Technische Universität Wien.
- Frischknecht, R., Stolz, P., Krebs, L., de Wilt-Scholten, M., & Sinha, P. (2020). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems* (S. 89) [Report T12-19:2020.]. International Energy Agency.
- GPO. (2010). *Dodd-Frank Wall Street Reform And Consumer Protection Act*.
- Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., Nuss, P., & Reck, B. K. (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4257–4262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>
- Gunn, G. (Hrsg.). (2014). *Critical metals handbook*. John Wiley & Sons; American Geophysical Union.

- Handke, V., & Kamburow, C. (2009). *Umweltstandards für thermische Solarkollektoren unter besonderer Berücksichtigung der selektiven Beschichtung ihrer Absorberoberflächen*. IZT.
- Hansmann, K.-W. (1983). *Kurzlehrbuch Prognoseverfahren*. Gabler Verlag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-663-06906-5>
- Hatayama, H., & Tahara, K. (2015). Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy. *Materials Transactions*, 56(2), 229–235.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014380>
- Haufler, V. (2010). The Kimberley Process Certification Scheme: An Innovation in Global Governance and Conflict Prevention. *Journal of Business Ethics*, 89(S4), 403–416.
<https://doi.org/10.1007/s10551-010-0401-9>
- Haxel, G. B., Hedrick, J. B., Orris, G. J., Stauffer, P. H., & Hendley II, J. W. (2002). *Rare earth elements—Critical resources for high technology* (Report Nr. 087–02; Fact Sheet, S. 4). U.S. Geological Survey; USGS Publications Warehouse.
<http://pubs.er.usgs.gov/publication/fs08702>
- Hilleringmann, U. (2004). *Silizium-Halbleitertechnologie* (4. Aufl.). B. G. Teubner Verlag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-322-94072-8>
- Hischier, R., Classen, M., Lehmann, M., & Scharnhorst, W. (2007). *Life Cycle Inventories of Electric and Electronic Equipment: Production, Use and Disposal. Part 1 Electronic Components* (Report Nr. 18; S. 200). Technology & Society Lab, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Hornbogen, E., Warlimont, H., & Skrotzki, B. (2019). *Metalle: Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen* (7. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57763-9>
- Hübner, R. (2013). Geplante Obsoleszenz. *Verbraucherpolitik, Verbraucherforschung*, 35.
- Huttrer, G. (2020). *Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report* (S. 17) [Update Report]. Proceedings World Geothermal Congress 2020.
- ICSG. (2021). *Members & Observers* [Corporate Website]. International Copper Study Group. <https://www.icsg.org/index.php/who-we-are/members-&-observers>
- ILZSG. (2021). *Membership* [Corporate Website]. ILZSG - Home.
<https://www.ilzsg.org/static/membership.aspx?from=1>

- INSG. (2021). *Member Countries* [Corporate Website]. International Nickel Study Group. <https://insg.org/index.php/organization/member-countries/>
- Jahan, A., Edwards, K. L., & Bahraminasab, M. (2016). *Multi-criteria Decision Analysis: For supporting the selection of engineering materials in product design* (2. Aufl.). Butterworth-Heinemann Ltd.
- JOGMEC. (2018). *Annual Report 2018* (S. 52) [Report]. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation.
- JOGMEC. (2021). *Financial support for Japanese companies* [Corporate Website]. Financial support for Japanese companies : Metals - JOGMEC. http://www.jogmec.go.jp/english/stockpiling/metal_10_000003.html
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>
- KOM. (2008). *Die Rohstoffinitiative—Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern* (S. 15) [Report]. Europäische Kommission.
- KOM. (2010). *Critical raw materials for the EU - Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials* (Critical Raw Materials for the EU, S. 85) [Report]. Europäische Kommission.
- KOM. (2011). *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze* (S. 27) [Report]. Europäische Kommission.
- KOM. (2014). *Report on Critical Raw Materials For The EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials* (S. 41) [Report]. Europäische Kommission.
- KOM. (2016). *European Rare Earths Competency Network (ERECON)*. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs - European Commission. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en
- KOM. (2020). *Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken* (S. 28) [Report]. Europäische Kommission.
- KORES. (2021a). *Our Structure* [Corporate Website]. Our Company - About Us -Korea Resources Corporation. <https://eng.kores.or.kr/views/cms/eng/ab/ab01/ab0102.jsp>

- KORES. (2021b). *PR Brochure* (S. 14) [Report]. Korea Resources Corporation.
- Lambert, A., Hirschnitz-Garbers, M., Wilts, H., & von Gries, N. (2014). *Kurzanalyse—Politikinstrumente zur Umsetzung von Rücknahmesystemen im Bereich Elektroaltgeräte* (S. 24) [Report]. Ecologic Institut & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- London Metal Exchange. (2021). *Metals* [Corporate Website]. London Metal Exchange: Home. <https://www.lme.com/Metals>
- Luidold, S., Kozlik, M., Raith, J. G., Janisch, A., Moser, P., Treimer, R., Flachberger, H., Streicher, C., Angerer, T., Antrekowitsch, H., Kaindl, M., Poscher, A., Stuhlpfarrer, P., Lampert, M., Pomberger, R., Prommegger, M., Sarc, R., Hermann, R., Gattringer, C., ... Salhofer, S. (2011). *Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich—Endbericht* (S. 352) [Report]. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Manstein, C., & Tertschnig, W. (2012). *Ressourceneffizienz Aktionsplan (REAP)—Wegweiser zur Schonung natürlicher Ressourcen* (S. 44) [Report]. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., & Espinoza, L. T. (2016). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016* (S. 353). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Martens, H., & Goldmann, D. (2016). *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis* (2. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5>
- Mayer-Jauck, H. (2020). *Österreichisches Montan-Handbuch 2020*. 94, 352.
- Melcher, F. (2014). Kritische Hochtechnologiemetalle – Verfügbarkeit in der EU mit Fokus auf Österreich. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 159(10), 406–410. <https://doi.org/10.1007/s00501-014-0307-4>
- metals4U. (2021, November 8). *What is Mild Steel? An in depth technical guide*. <https://www.metals4u.co.uk/blog/mild-steel-in-depth-guide>
- Minerals Intelligence Network for Europe. (2021). *The Minerals4EU Project* [Corporate Website]. Minerals4EU Project. <http://www.minerals4eu.eu/index.php/about>
- Moss, R., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J. (2011). Critical Metals in Strategic Energy Technologies - Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-

Carbon Energy Technologies . EUR 24884 EN. Luxembourg (Luxembourg):
Publications Office of the European Union; JRC65592

- Müller, A. (2018). *Rohstoffe für die Energiewende—Menschenrechtliche und ökologische Verantwortung in einem Zukunftsmarkt* (S. 56) [Report]. Bischöfliches Hilfswerk MISEREOR e.V.
- Nassar, N. T., Xun, S., Fortier, S., & Schoeberlein, D. (2016). *Assessment of Critical Minerals: Screening Methodology and Initial Application* (S. 57) [Report]. National Science and Technology Council.
- National Research Council. (2008). *Minerals, Critical Minerals and the U.S. Economy* (S. 263) [Report]. National Research Council.
- Neukirchen, F. (2016). *Von der Kupfersteinzeit zu den Seltenen Erden*. Springer Spektrum.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-49347-2>
- OECD. (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>
- Ostermann, F. (2014). *Anwendungstechnologie Aluminium* (3. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43807-7>
- Österreichische Bundesregierung. (2020). *Regierungsprogramm 2020-2024* (S. 328). Österreichische Bundesregierung.
- Razdan, P., & Garrett, P. (2017). *Life Cycle Assessment of electricity production from an Onshore V112-3.45 MW Wind Plant* (S. 137) [Report]. Vestas.
- Scherhauser, S., Part, F., & Beigl, P. (2020). Das Sekundärressourcenpotenzial aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 1–13.
<https://doi.org/10.1007/s00506-020-00723-3>
- Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Seal II, R. R., & Bradley, D. C. (2017). *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply* (Professional Paper, S. 862) [Report]. U.S. Geological Survey.
- Statista. (2021, September 13). *Durchschnittspreise mineralischer Rohstoffe bis 2019* [Corporate Website]. Statista.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/260427/umfrage/durchschnittspreise-ausgewaehlter-mineralischer-rohstoffe/>
- Tiess, G. (2009). *Rohstoffpolitik in Europa—Bedarf, Ziele, Ansätze*. SpringerWienNewYork.

- USGS. (2020). *Mineral Commodity Summaries 2020* (Mineral Commodity Summaries, S. 200) [Report]. U.S. Geological Survey.
- USGS. (2021). *Mineral Commodity Summaries* (S. 200) [Report]. U.S. Geological Survey.
- Viebahn, P., Arnold, K., Friege, J., Krüger, C., Nebel, A., Samadi, S., Soukup, O., Ritthoff, M., Teubler, J., & Wiesen, K. (2014). *Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems* (Abschlussbericht Nr. 0325324). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- Weber, L. (2012). *Der Österreichische Rohstoffplan* (Bd. 26). Geologische Bundesanstalt.
- Weismayr, D. (2021). *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich—Statusbericht 2021* (S. 162) [Statusbericht]. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Weiss, W., & Spörk-Dür, M. (2020). *Solar Heat Worldwide—Global Market Development and Trends in 2019 / Detailed Market Data 2018* (S. 90). Institute for Sustainable Technologies & International Energy Agency.
- Wiener Zeitung. (2012). *Rohstoffe: Österreich schielt in die Mongolei* [Corporate Website]. Wirtschaft Österreich - Wiener Zeitung Online.
https://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wirtschaft/oesterreich/455663_Rohstoffe-Oesterreich-schielt-in-die-Mongolei.html
- WTO. (2014). *China—Measures related to the Exportation of Rare earths, Tungsten, and Molybdenum. Reports of the Panel* (Report Nr. 14–1756; S. 257). World Trade Organization.
- Zimmermann, T. (2013). Parameterized tool for site specific LCAs of wind energy converters. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 49–60.
<https://doi.org/10.1007/s11367-012-0467-y>

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Kritikalitätsstudien. Die von jeder Studie untersuchten Elemente sind mit einer "0" gekennzeichnet, während die als kritisch identifizierten Elemente durch eine "1" gekennzeichnet sind.....	8
Tabelle 2: Potenzielle kritische mineralische Stoffe in erneuerbaren Energieanlagen (Eigene Darstellung) (Cichy, 2017; Handke & Kamburow, 2009; Marscheider-Weidemann et al., 2016; Viebahn et al., 2014)	10
Tabelle 3: Kriterien zur Bestimmung der Relevanzstufe (Viebahn et al., 2014, S. 50).....	11
Tabelle 4: Relevanzeinschätzung für Technologien der erneuerbaren Energien hinsichtlich des Einsatzes mineralischer Rohstoffe (Viebahn et al., 2014, S. 51)	11
Tabelle 5: Jährlich installierte Kollektorfläche (m ²) und Kollektorleistung (MW _{th}) in Österreich ab dem Jahr 1995 (Eigene Darstellung) (Biermayr et al., 2019, S. 141–142)	14
Tabelle 6: Materialzusammensetzung einer solarthermischen Anlage mit verglastem Flachkollektor (Handke & Kamburow, 2009, S. 40)	18
Tabelle 7: Zusammensetzung einer durchschnittlichen STA nach Anwendungsbereich, Systemkomponenten und Materialien in kg/m ² (Handke & Kamburow, 2009, S. 40)	19
Tabelle 8: Gesamte installierte PV-Leistung und Anlagenzahl von 1992 bis 2019 (E-Control, 2020).....	21
Tabelle 9: Materialzusammensetzung einer PVA mit siliziumbasierter Technologie nach System-, Haupt- und Subkomponenten und Materialien (Frischknecht et al., 2020; Scherhauser et al., 2020)	25
Tabelle 10: Zusammensetzung einer PVA mit siliziumbasierter Technologie nach Hauptkomponenten und Materialien in kg/kWp	26
Tabelle 11: Materialzusammensetzung und Komponenten einer Vestas V112-3.45 MW (Hischier et al., 2007; Razdan & Garrett, 2017)	31
Tabelle 12: Materialzusammensetzung einer Vestas V112-3.45 MW basierend auf einem 100-MW-Windpark (in t/MW) (Razdan & Garrett, 2017).....	32
Tabelle 13: Materialzusammensetzung und Materialbedarf einer Enercon E82 2,3 MW (in t) (Zimmermann, 2013, S. 52)	33
Tabelle 14: Kumulierter kritischer Rohstoffbedarf der in Österreich neu installierten PVA bis zum Jahr 2040 (in t)	38
Tabelle 15: Kumulierter kritischer Rohstoffbedarf der in Österreich prognostizierten WKA bis zum Jahr 2040 (in t)	40
Tabelle 16: Kumulierter kritischer Rohstoffbedarf der in Österreich neu installierten STA, PVA und WKA bis zum Jahr 2040 (in t)	41
Tabelle 17: Elementare Zusammensetzung der Erdkruste (Budd, 1999, S. 3)	45
Tabelle 18: In Verkehr gesetzte Elektro- und Elektronikgeräte 2019 (Eigene Darstellung) (Weismayr, 2021, S. 59).....	71
Tabelle 19: Kritische Elemente in den erneuerbaren Energieanlagen Österreichs	84
Tabelle 20: Handlungsoptionen für einen verbesserten Umgang mit kritischen Metallen	86

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erzeugungsstruktur der erneuerbaren Energien in Österreich im Jahr 2019 (Eigene Darstellung) (BMK, 2020, S. 18)	1
Abbildung 2: Kritikalität von Elementen nach Auswertung von 10 Studien (Baranzelli et al., 2017; BGS, 2015; Blengini et al., 2020; Bortnikov et al., 2016; Graedel et al., 2015; Hatayama & Tahara, 2015; McCullough & Nassar, 2017; Nassar et al., 2016; Schulz et al., 2017).....	9
Abbildung 3: Überblick über unterschiedliche Kollektor-Technologien (Eigene Darstellung) (Evangelisti et al., 2019, S. 2)	15
Abbildung 4: Jährlich installierte Kollektorfläche und Kollektorleistung nach Kollektor- Typen (Eigene Darstellung) (Biermayr et al., 2019, S. 140)	16
Abbildung 5: Ermittelte Materialmenge kritischer Elemente in STA Österreichs (in t)	20
Abbildung 6: Überblick über unterschiedliche PV-Technologien (Eigene Darstellung) (Wade 2013 zitiert in (Benedek et al., 2014, S. 236).....	22
Abbildung 7: Jährlich in Österreich installierte Leistung und kumulierte Leistung nach Technologien (Eigene Darstellung) (Biermayr et al., 2019, S. 106–109).....	23
Abbildung 8: Ermittelte Materialmenge kritischer Elemente in PVA Österreichs (in t)	27
Abbildung 9: Jährlich in Österreich installierte Leistung und kumulierte Leistung von 1994 bis 2019 (Eigene Darstellung) (Biermayr et al., 2019, S. 209)	28
Abbildung 10: Marktanteile der Hersteller von Windkraftanlagen am österreichischen Bestand 2019 (Quelle: (Biermayr et al., 2019, S. 211)	29
Abbildung 11: Ermittelte Materialmenge kritischer Elemente in WKA Österreichs (in t)	34
Abbildung 12: Kritische Elemente in Solarthermie-, Photovoltaik- und Windkraftanlagen Österreichs.....	35
Abbildung 13: Entwicklung der installierten Leistung von STA bis zum Jahr 2040 basierend auf der Prognose-Funktion von Microsoft Excel	36
Abbildung 14: Entwicklung der installierten Leistung von PVA bis zum Jahr 2040 basierend auf der Prognose-Funktion von Microsoft Excel	37
Abbildung 15: Entwicklung der installierten Leistung von WKA bis zum Jahr 2040 basierend auf der Prognose-Funktion von Microsoft Excel	39
Abbildung 16: Abundanz (Atomanteil) der chemischen Elemente in der oberen kontinentalen Erdkruste als Funktion der Ordnungszahl. Viele der Elemente werden in (sich teilweise überschneidende) Kategorien eingeteilt: (1) gesteinsbildende Elemente (Hauptelemente im grünen Feld und Nebenelemente im hellgrünen Feld); (2) Seltene Erden (Lanthanoide, La-Lu und Y; blau markiert); (3) Haupt- Industriemetalle (weltweite Produktion $\geq 3 \times 10^7$ kg/Jahr; rot markiert); (4) Edelmetalle (orange); und (5) die neun seltensten "Metalle" - die sechs Platingruppenelemente plus Au, Re und Te (ein Metalloid) (Haxel et al., 2002, S. 3)	43
Abbildung 17: McKelvey Diagramm (Eigene Darstellung) (USGS, 2020, S. 197)	44
Abbildung 18: Länder mit der größten Aluminium-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 31).....	46
Abbildung 19: Länder mit den größten Bauxit-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 31)	46
Abbildung 20: Länder mit der größten Kupfer-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 53).....	48

Abbildung 21: Länder mit den größten Kupfer-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 53)	48
Abbildung 22: Länder mit der größten Eisen-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 89).....	49
Abbildung 23: Länder mit den größten Eisen-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 89).....	50
Abbildung 24: Länder mit der größten Silizium-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 149).....	51
Abbildung 25: Länder mit der größten Zinn-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 173).....	52
Abbildung 26: Länder mit den größten Zinn-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 173).....	53
Abbildung 27: Länder mit der größten Silber-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 151).....	54
Abbildung 28: Länder mit den größten Silber-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 151).....	54
Abbildung 29: Länder mit der größten Blei-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 95).....	55
Abbildung 30: Länder mit den größten Blei-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 95).....	56
Abbildung 31: Länder mit der größten Zink-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 191).....	57
Abbildung 32: Länder mit den größten Zink-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 191).....	57
Abbildung 33: Länder mit der größten Gold-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 71).....	58
Abbildung 34: Länder mit den größten Gold-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 71).....	59
Abbildung 35: Länder mit der größten Molybdän-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 111).....	60
Abbildung 36: Länder mit den größten Molybdän-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 111)	60
Abbildung 37: Länder mit der größten Palladium-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 125).....	61
Abbildung 38: Länder mit den größten Palladium-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 125)	62
Abbildung 39: Länder mit der größten Chrom-Produktion im Jahr 2020 (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 47).....	63
Abbildung 40: Länder mit den größten Chrom-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 47)	64
Abbildung 41: Länder mit der größten Mangan-Produktion (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 105)	65
Abbildung 42: Länder mit den größten Mangan-Reserven (Eigene Darstellung) (USGS, 2021, S. 105)	65
Abbildung 43: Länder mit dem größten Anteil an der Produktion der identifizierten kritischen Rohstoffe (farbig) und an den Reserven (Kreise).	67

10. Abkürzungsverzeichnis

Ac	Actinium
Ag	Silber
Al	Aluminium
Am	Americium
Ar	Argon
As	Arsen
At	Astat
Au	Gold
B	Bor
Ba	Barium
Be	Beryllium
Bh	Bohrium
Bi	Bismut
Bk	Berkelium
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BMLRT	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus
BMFWF	Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft
BOS	Balance of System
Br	Brom
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
Cd	Cadmium
Cds	Cadmiumsulfid
CdTe	Cadmiumtellurid
Ce	Cer
Cf	Californium
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
Cl	Chlor
Cm	Curium
cm ²	Quadratcentimeter
cm ³	Kubikcentimeter
Cn	Copernicium
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cs	Cäsium
Cu	Kupfer
Db	Dubnium
Ds	Darmstadtium
Dy	Dysprosium
EFH	Einfamilienhaus
EGS	EuroGeoSurveys
EK	Europäische Kommission

EPDMA	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke
Er	Erbium
Es	Einsteinium
EU	Europäische Union
Eu	Europium
EVA	Ethylenvinylacetat
F	Fluor
Fe	Eisen
Fl	Flerovium
Fm	Fermium
Fr	Francium
g	Gramm
Ga	Gallium
GBA	Geologische Bundesanstalt
Gd	Gadolinium
Ge	Germanium
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GW	Gigawatt
H	Wasserstoff
HDPE	High Density Polyethylen
He	Helium
Hf	Hafnium
Hg	Quecksilber
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin layer
Ho	Holmium
Hs	Hassium
I	Iod
In	Indium
In ₂ S ₃	Indium(III)-sulfid
Ir	Iridium
JOGMEC	Japan Oil, Gas and Metals National Corporation
K	Kalium
Kg	Kilogramm
KORES	Korea Resources Corporation
Kr	Krypton
kW	Kilowatt
kWp	Kilowatt-Peak
l	Liter
La	Lanthan
LCA	Life Cycle Assessment
LED	Light-emitting diode
Li	Lithium
LME	London Metal Exchange
Lr	Lawrencium
Lu	Lutetium
Lv	Livermorium
m ²	Quadratmeter
Mc	Moscovium

Md	Mendelevium
MFH	Mehrfamilienhaus
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Mt	Meitnerium
MW	Megawatt
MW _p	Megawatt-Peak
MW _{th}	Megawatt thermisch
N	Stickstoff
Na	Natrium
Nb	Niob
Nd	Neodym
Ne	Neon
Nh	Nihonium
Ni	Nickel
No	Nobelium
Np	Neptunium
O	Sauerstoff
Og	Oganesson
Os	Osmium
P	Phosphor
Pa	Protactinium
Pb	Blei
Pd	Palladium
PGM	Platinum Group Elements (Platinmetalle)
PJ	Petajoule
Pm	Promethium
Po	Polonium
Pr	Praseodym
Pt	Platin
Pu	Plutonium
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaikanlage
Ra	Radium
Rb	Rubidium
Re	Rhenium
REAP	Ressourceneffizienz Aktionsplan
REE	Rare Earth Elements (Seltenen Erden)
Rf	Rutherfordium
Rg	Röntgenium
Rh	Rhodium
Rn	Radon
Ru	Ruthenium
S	Schwefel
Sb	Antimon
Sc	Scandium
Se	Selen

SF6-Gas	Schwefelhexafluorid
Sg	Seaborgium
Si	Silizium
Sm	Samarium
Sn	Zinn
Sr	Strontium
STA	Solarthermieranlage
t	Tonne
Ta	Tantal
Tb	Terbium
Tc	Technetium
Te	Tellur
Th	Thorium
Ti	Titan
Tl	Thallium
Tm	Thulium
TPE	Thermoplastische Elastomere
Ts	Tenness
TWh	Terawattstunde
U	Uran
u	Atomare Masseneinheit
USGS	United States Geological Survey
V	Vanadium
W	Wolfram
WKA	Windkraftanlage
WTO	Welthandelsorganisation
Xe	Xenon
Y	Yttrium
Yb	Ytterbium
Zn	Zink
ZnS	Zinksulfid
Zr	Zirkonium
µm	Mikrometer
3TG	Konfliktminerale (Zinn, Tantal, Wolfram und Gold)