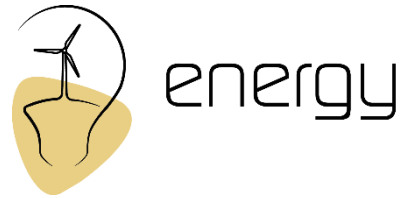




Initiative für nachhaltiges technisches Engagement



Energy #e03

Energy-Paradox

Energie- und Rohstoffbedarf beim Ausbau erneuerbarer Energien

Mitwirkende

Katrin Salbrechter | Sarah Reiter | Thomas Pinter | Lukas Wechner | Christoph Rinnhofer | Marcus Schlager | Sebastian Stock | Vanessa Zawodnik | Claus Trost | Christoph Ponak | Lukas Höber

Leoben, Februar 2023

Kurzfassung

Österreich hat sich mit dem 2021 beschlossenen Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG) zum Ziel gesetzt, bis 2030 einen Ökostromanteil von 100 % vorzuweisen. Mit diesem Ausbauziel geht jedoch enormer Materialbedarf einher. Durch die Förderung der Rohstoffe, den Transport und die Weiterverarbeitung dieser Materialien, entsteht zusätzlicher Energiebedarf. Zudem fallen bei jedem dieser Schritte Emissionen als CO₂-Äquivalente an. Daraus ergibt sich folgendes Paradoxon: Der Ausbau erneuerbarer Energie führt demnach anfangs sogar zu einem erhöhten Ausstoß an CO₂. Das Paradoxon in Zahlen zu fassen ist eine komplexe Thematik; vor allem wenn man sie auf die weltweiten Energie- und Klimavorgaben erweitern möchte. Im Rahmen dieses Berichtes soll dazu eine Berechnungsgrundlage geschaffen werden, indem der CO₂-Ausstoß und Energiebedarf der wichtigsten Materialien für den Erneuerbaren Ausbau laut dem EAG ermittelt werden. Berücksichtigt werden dabei jene Windkraft- und PV-Anlagen, die zur Erreichung des österreichischen Energiezieles installiert werden müssen. Als Grundlage für die Berechnungen dient der Bericht „Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system“ der Europäischen Kommission von 2020, in welchem der Materialbedarf für die auszubauenden Technologien abgeschätzt wird. Der daraus abgeleitete Energiebedarf für die Herstellung der betrachteten Materialien führt zu einem Gesamtausstoß an CO₂-Äquivalenten für den Ausbau von Windkraft und PV-Anlagen. Neu zu errichtende Windkraftanlagen werden mit einer Durchschnittsleistung von 4,52 MW und 2300 jährlichen Volllaststunden betrachtet. Die untersuchten Materialien sind: Zement, Stahl, Kupfer und Aluminium. Bei neuinstallierten PV-Anlagen wird eine Durchschnittsleistung von 0,9 MW pro Hektar angenommen. Die untersuchten Materialien für deren Herstellung sind: Zement, Stahl, Ethylen-Vinylacetat, Glas, Aluminium, Kupfer und Silber. Die Betrachtung von Silizium wird in der aktuellen Fassung dieses Berichtes vernachlässigt. Die Berechnungen zeigen, dass zum Erreichen der vorgegebenen Ziele bis 2030, 962 Windkraftanlagen gebaut und eine Gesamtfläche von 122 km² mit PV-Paneelen ausgekleidet werden müssen. Das entspricht einem Gesamtausstoß von 5 914 341 t CO_{2,eq}, was in etwa 7,5 % des jährlichen Treibhausgasausstoßes von Österreich im Jahre 2019 entspricht. Abhängig von den technologischen Entwicklungen in den nächsten Jahren ist zu erwarten, dass der Strombedarf in Österreich weiter steigen wird. Um einen Ökostromanteil von 100 % bis 2030 zu erreichen, müssen die Ausbauraten von PV- und Windkraftanlagen deutlich erhöht werden und gegebenenfalls ein Ausbau über die Ziele des EAG hinaus vorgenommen werden.

Abstract

With the Renewable Expansion Act (EAG) adopted in 2021, Austria has set itself the goal of achieving a 100% share of green electricity by 2030. However, this expansion target is accompanied by an enormous additional demand for materials. The extraction of raw materials, their transport and further processing require additional energy. Therefore, each of these steps produces CO₂ emissions. This gives rise to a paradox: the expansion of renewable energy initially leads to increased CO₂ emissions. Putting this paradox into figures is a complex issue, especially when extending the scope to global energy and climate targets. Therefore, the aim of this report is to provide a calculation basis by determining the CO₂ emissions and energy consumption of the most important materials for achieving the renewable development goals according to the EAG. The wind turbines and PV systems required to achieve the Austrian energy target are considered. The calculations are based on the report „Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system“ of the European Commission from 2020, in which material requirements for the expansion of renewable energies were estimated. The derived energy demand for the production of the considered materials is used to calculate total emission of CO₂ equivalents for the expansion of wind power and PV plants. To put the results into perspective, calculated values are additionally given as a percentage of Austria's CO₂ emissions (2019 data). Wind power plants were considered with an average capacity of 4,52 MW and 2300 yearly full load hours. Studied materials are: Cement, steel, copper and aluminum. Newly installed PV systems were assumed to have average capacity of 0.9 MW per hectare. Materials studied for the production of PV modules are: Cement, steel, ethylene-vinyl-acetate, glass, aluminum, copper, and silver. Silicium was neglected due to insufficient data. Calculations show that in order to achieve the set targets by 2030, 962 wind turbines must be built and a total area of 122 km² must be lined with PV panels. This results in a total emission of 5,914,341 t CO_{2eq}, which is roughly equivalent to 7.5% of Austria's annual greenhouse gas emissions in 2019. Depending on technological developments in the coming years, it is expected that electricity demand in Austria will continue to increase. To achieve a green electricity share of 100% by 2030, the expansion rates of PV and wind power plants have to be increased significantly and, if necessary, an expansion beyond the targets of the EAG has to be undertaken.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
2 Modell- und Berechnungsgrundlagen	3
2.1 Berechnungsgrundlagen für Windkraftanlagen	5
2.2 Berechnungsgrundlagen für PV-Anlagen	6
3 Ergebnisse	8
3.1 Windkraftanlagen.....	8
3.2 PV-Anlagen	9
4 Diskussion und Fazit	10
4.1 Limitierung der Berechnung.....	10
4.2 Windkraftanlagen.....	11
4.3 PV-Anlagen	12
4.4 Vergleich mit aktuellen Ausbauraten in Österreich.....	12
4.5 Fazit.....	15
5 Zusammenfassung	16
6 Literaturverzeichnis.....	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausbau von Ökostrom in Österreich bis 2030 inklusive Aufspaltung auf die erneuerbaren Energien, eigene Grafik mit Werten übernommen aus [1]	1
Abbildung 2: Jährlich installierte Leistung und kumulierte Leistung von PV-Anlagen in Österreich von 2005-2020 in MW [20]	13
Abbildung 3: PV- Zubau in Österreich 2010-2020 und erforderlicher Ausbau 2021-2030 [30]	14
Abbildung 4: Jährlich installierte und kumulierte Leistung von Windkraftanlagen in Österreich von 2005-2020 [20]	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifischer Energiebedarf für die Herstellung einer Tonne der betrachteten Materialien.....	4
Tabelle 2: Der leistungsspezifische Materialbedarf für Windkraftanlagen aus dem Bericht „Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transitions towards a decarbonised energy system“ der europäischen Kommission [2] von 2020	6
Tabelle 3: Leistungsspezifischer Materialbedarf für PV-Anlagen aus dem Bericht der europäischen Kommission.....	7

Tabelle 4: Gesamtübersicht der Ergebnisse für den Windkraft-Ausbau (962 neue Windkraftanlagen) bis 2030 inkl. Materialbedarf, Energiebedarf zur Materialherstellung und die anfallenden Emissionen in CO₂-Äquivalenten.....8

Tabelle 5: Gesamtübersicht der Ergebnisse für den PV-Ausbau bis 2030 inkl. Materialbedarf, Energiebedarf zur Materialherstellung und Emissionen in CO₂-Äquivalenten.9

1 Einleitung

Im Juli 2021 wurde durch Zweidrittelmehrheit im österreichischen Parlament das Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG) beschlossen. Das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie beschreibt das Gesetz als die bedeutsamste Reform im Energiesektor seit Jahren, mit dem Ziel die Energiewende voranzutreiben und bis zum Jahr 2030 in Österreich einen Ökostromanteil von 100 Prozent vorzuweisen. Die Vorgaben sollen durch einen Ausbau erneuerbarer Energien um zusätzlich 27 Terawattstunden (TWh) bis 2030 erreicht werden. Diese gliedern sich in 11 TWh Photovoltaik (PV), 10 TWh Windkraft, 5 TWh Wasserkraft und 1 TWh Biomasse auf. Somit muss die aktuelle Ökostromleistung von 55,6 TWh um knapp 50 % gesteigert werden [1].

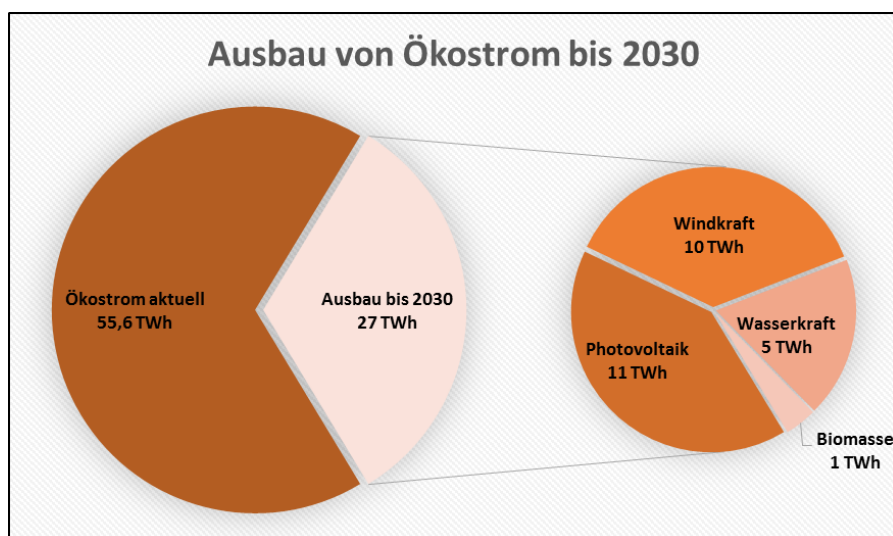


Abbildung 1: Ausbau von Ökostrom in Österreich bis 2030 inklusive Aufspaltung auf die erneuerbaren Energien, eigene Grafik mit Werten übernommen aus [1]

Zusätzlich zu den finanziellen Kosten von etwa einer Milliarde Euro jährlich [1], hat der Ausbau erneuerbarer Energien einen enormen zusätzlichen Ressourcenbedarf zur Folge. Um beispielsweise eine Windkraftanlage (WKA) zu errichten, sind unter anderem große Mengen an Stahl, Beton und Kupfer erforderlich. Für PV-Anlagen sind zusätzlich Rohstoffe wie Glas, Silizium und Silber von besonderer Bedeutung [2]. Außerdem entsteht für die Förderung der

Rohstoffe, sowie deren Transport und Weiterverarbeitung ein zusätzlicher Energiebedarf. Ebenso muss bedacht werden, dass für den angestrebten Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen gegebenenfalls zusätzliche Produktionskapazitäten geschaffen werden müssen. Auch das führt zu einem Rohstoffeinsatz, mit dem wiederum Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen einhergehen.

Die zum Ausbau erneuerbarer Energieformen benötigte Energie kann im Idealfall zwar durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden, üblicherweise gelangen aber Großteils fossile Energieträger zum Einsatz. Dadurch entstehen Treibhausgase, einerseits durch den Rohstoffabbau, -Transport und Produktionsprozess selbst (z.B. Zementherstellung), andererseits durch die Bereitstellung der notwendigen Produktionsenergie.

Aus der beschriebenen Problematik ergibt sich daher ein Paradoxon: Der Ausbau erneuerbarer Energie mit dem Ziel der CO₂-Neutralität führt zunächst sogar zu einem erhöhten Ausstoß an CO₂. Die langfristig angestrebte CO₂-Neutralität rückt daher scheinbar in weitere Ferne. Dies ist das sogenannte „Energy-Paradox“.

1.1 Zielsetzung

Ziel des vorliegenden Berichtes ist eine Quantifizierung des Effektes des „Energy-Paradox“ für Wind- und PV-Anlagen in Österreich. Dabei werden die Ausbauziele laut dem EAG berücksichtigt und die wichtigsten Materialien bestimmt, die für die Herstellung erneuerbarer Energien notwendig sind. Die Daten dafür stammen aus der Veröffentlichung „Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system“ der Europäischen Kommission von 2020 [2]. In dieser Abhandlung wird der Materialbedarf für erneuerbare Technologien abgeschätzt. Diese werden in Bezug auf ihren Energieverbrauch für den Rohstoffabbau, ihre Herstellung, sowie den dabei verursachten CO₂-Ausstoß analysiert und gegenübergestellt. Daraus können die zusätzlichen CO₂-Emissionen bis 2030 zur Erreichung der EAG-Ziele errechnet werden. Konkludiert wird der Bericht mit der Untersuchung der aktuellen Ausbauraten für Windkraft- und PV-Anlagen in Österreich.

Damit dient dieser Bericht als Berechnungsgrundlage, auf dessen Basis die Betrachtung des „Energy-Paradox“ für weitere erneuerbare Energien, wie Wasserkraft und Biomasse erweitert werden kann. Zusätzlich kann diese Betrachtung auf weitere wichtige Materialien für erneuerbare Erzeugungsanlagen angewandt werden. Unter Einbezug weiterer Energie- und Klimavorgaben, ist eine Erweiterung der Berechnung auch auf andere Länder und Regionen möglich.

2 Modell- und Berechnungsgrundlagen

Basierend auf den Daten des EAG, wird die Anzahl and Windkraft- und PV-Anlagen ermittelt, die zur Erreichung der österreichischen Energieziele installiert werden müssen. Der zusätzlich angestrebte Ausbau an Wasserkraft und Biomasse wird im Rahmen dieses Berichtes vernachlässigt, da Wind- und PV-Anlagen den größten Anteil an den Zielen ausmachen.

Aus den Ausbauzielen des EAG, mit 10 TWh für Windkraft und 11 TWh für PV-Anlagen wird der Materialbedarf laut dem Bericht „Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system“ der Europäischen Kommission [2] von 2020 abgeschätzt. Für Windkraftanlagen werden in dieser Berechnung die Materialien Zement, Stahl, Aluminium und Kupfer berücksichtigt. Auf die Inkludierung von Stoffen wie Eisen, Polymer und Glas, die ebenfalls einen hohen Anteil am Materialbedarf aufweisen, wird in dieser Berechnungsgrundlage verzichtet. Für PV-Module werden Stahl, Aluminium, Kupfer, Zement, Glas, EVA (Ethylen-Vinylacetat) und Silber berücksichtigt. Spezielle Materialien (wie z.B. das selten vorkommende Indium für PV-Module) werden auf Grund unzureichend verfügbarer Daten nicht in die Berechnung mitaufgenommen.

Sowohl für den Abbau der Rohstoffe als auch die Herstellung der notwendigen Materialien wird Energie benötigt. Der Energiebedarf, der bei der Produktion der Materialien anfällt, wird in Tabelle 1 angegeben. Die Daten für Zement setzen sich zusammen aus dem Strombedarf für die Herstellung, die Bereitstellung für den nötigen Wärmebedarf durch Verbrennung von Stoffen wie Kohle, Siedlungs- oder Industriefälle und den Transport der Rohmaterialien [3]. Für Stahl wird der Energiebedarf für die Herstellung von Stahl aus dem Erz berücksichtigt. Der Bedarf für Rohstoffabbau und Transport ist in diesen Wert nicht inkludiert [4]. Für EVA sind in der genannten Quelle keine genauen Spezifikationen gegeben, welche Parameter für den Wert des Energiebedarfs berücksichtigt werden [5]. In der Glasherstellung wird zur Bereitstellung der notwendigen Wärmeenergie für das Schmelzen des Glases Erdgas verbrannt. Im Energiebedarf wird sowohl der Erdgasverbrauch als auch sonstige Stromnutzung für die Herstellung berücksichtigt [6]. Der Energiebedarf von Aluminium setzt sich aus dem Bedarf der gesamten Wertschöpfungskette zusammen. Es wird sowohl der Abbau des Rohbauxits bis hin zur Produktion des Aluminiums berücksichtigt. Energie die für

den Transport notwendig ist, ist jedoch nicht inkludiert [7]. Für Kupfer wird ebenfalls der Abbau vom Roherz bis hin zur Raffinerie des Kupfers selbst berücksichtigt, hier ist der Transport inkludiert [8]. Der Energiebedarf für Silber wird in der genannten Quelle nicht genauer spezifiziert [9].

Tabelle 1: Spezifischer Energiebedarf für die Herstellung einer Tonne der betrachteten Materialien

Material	Spezifischer Energiebedarf für die Herstellung [GJ/t]	Quelle
Zement	2,8	[3]
Stahl	20	[4]
EVA	19	[5]
Glas	7,5	[6]
Aluminium	98,0	[7]
Kupfer	28,2	[8]
Silber	1500	[9]

Der Energiebedarf wird also nicht nur durch erneuerbare Energien gedeckt, sondern häufig durch die Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Materialien. Auch entstehen bei der Herstellung der Rohmaterialien durch den Prozess selbst CO₂-Emissionen. Im Fall von beispielsweise Zement werden diese Prozessemissionen unter anderem durch das Austreiben von Kohlenstoff aus dem Kalkstein verursacht [3]. Eine Übersicht der CO₂-Emissionen für die berücksichtigten Materialien ist in Tabelle 2 gegeben. Für die Ermittlung der Emissionen werden alle Treibhausgase berücksichtigt und in Tonnen CO₂-Äquivalenten (t CO₂-ä.) angegeben. Für Kupfer wird ein mittlerer Wert von 5,8 t CO₂-ä./t Cu für die weitere Berechnung verwendet [10].

Tabelle 2: CO₂-Ausstoß der betrachteten Materialien für den Bau von Wind- und PV-Anlagen

	Spezifischer-CO ₂ -Ausstoß [t CO ₂ -ä./t Material]	Quelle
Stahl	1,85	[11]
Aluminium	18	[12]
Kupfer	5,5-6	[10]
Zement	0,59	[13]
Glas	0,9	[14]
EVA (Ethylen-Vinylacetat)	3,5	
Silber	132	

2.1 Berechnungsgrundlagen für Windkraftanlagen

Der Bericht der Europäische Kommission [2] gibt eine detaillierte Übersicht über die unterschiedlichen Typen von Windturbinen und ihren spezifischen Materialbedarf. Dabei reicht der Bedarf von beispielsweise Zement von 243,5 t/GW für DD-PMSG (Direktantrieb mit Permanentmagneten) zu 413 t/GW für GB-PMSG (Getriebe mit Permanentmagneten) Typen. Zur Berechnung wird für jedes Material der jeweils geringste Materialbedarf angenommen, unabhängig davon welche Turbine verwendet wird. Der spezifische Materialbedarf ist der Tabelle 2 zu entnehmen. Die Werte enthalten den Bedarf für die Windanlage und ihr Fundament. Die Quelle gibt dabei den leistungsspezifischen Materialbedarf an, merkt aber an, dass der Materialbedarf mit größeren Leistungen nicht unbedingt linear zunimmt. Damit handelt es sich bei diesen Werten um Durchschnittsgrößen. Exkludiert vom Materialbedarf sind Kabel und Transformatorstationen.

Tabelle 2: Der leistungsspezifische Materialbedarf für Windkraftanlagen aus dem Bericht „Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transitions towards a decarbonised energy system“ der europäischen Kommission [2] von 2020

Materialien	Leistungsspezifischer Materialbedarf [t/GW]	Quelle
Zement	243	[2]
Stahl	107	
Aluminium	0,5	
Kupfer	0,95	

Die Austrian Wind Energy Association gibt für moderne Windkraftanlagen einen durchschnittlichen Betrieb von 2300 Volllaststunden jährlich an [15]. Als Berechnungsgrundlage für die durchschnittliche Leistung einer geplanten Anlage wird der Mittelwert der Leistungen jener Anlagen herangezogen, welche laut Austrian Wind Energy Association im Jahr 2023 in Österreich errichtet werden sollen. Die mittlere Leistung einer WKA beträgt somit 4,52 MW [16]. Diese Werte dienen als Grundannahme für die Berechnung der Windkraftanlagen.

2.2 Berechnungsgrundlagen für PV-Anlagen

Um das verfügbare Potential an Photovoltaik bestmöglich zu nutzen, werden in den kommenden Jahren unterschiedlichste Ausführungen an PV-Anlagen installiert. Möglich ist eine Montage an Fassaden oder auf Dach- bzw. Freiflächen. Die Leistung der installierten PV-Anlage variiert dabei in Abhängigkeit der verfügbaren Fläche, der Ausrichtung und des Neigungswinkels. Im Berechnungsmodell wird keine Unterscheidung in der Montageart der PV-Anlage beachtet. Je nach regionalen Gegebenheiten und staatlichen Förderungen können die Anteile an PV-Anlagen an Fassaden, Dachflächen oder Freiflächen stark variieren. Deshalb wird eine durchschnittliche bereitgestellte Leistung einer neu installierte PV-Anlage in

Deutschland mit ca. 1 MW_p/ha¹ recherchiert. Als Leistungsdichte für die durchgeführten Berechnungen wird ein Wert von durchschnittlich 0,9 MW/ha herangezogen. Weiters wird der spezifische Ertrag berücksichtigt, dieser ist definiert als Energieertrag in kWh der pro Kilowatt-Peak (kW_p) gewonnen werden kann. Laut Fraunhofer ISE [17] liegt dieser in einem Bereich von 800 kWh/kW_p für nicht optimal ausgerichtete Anlagen bis zu 1100 kWh/kW_p für optimal ausgerichtete Anlagen. Für die Berechnung wird eine Annahme von durchschnittlich 1000 kWh/kW_p getroffen. Unter Berücksichtigung dieser Angaben kann beispielsweise eine Anlage mit 5 kW_p-Spitzenleistung einen Jahresertrag von 5000 kWh erbringen. Der spezifische Materialbedarf für die berücksichtigten Stoffe für PV-Anlagen ist in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Leistungsspezifischer Materialbedarf für PV-Anlagen aus dem Bericht der europäischen Kommission

		Leistungsspezifischer Materialbedarf [t/MW]	Quelle
Materialien für Strukturbauteile und elektrische Komponenten	Zement	60,7	[18]
	Stahl	67,9	
	EVA	8,6	
	Glas	46,4	
	Aluminium	7,5	
	Kupfer	4,6	
Material für elektrische Komponente	Silber	0,013-0,018	[19]

¹ 1 MW_p/ha bedeutet eine Spitzenleistung von 1 MW pro einem Hektar an PV-Modul

3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Berechnungen für den Material- und Energiebedarf für den Ausbau von 10 bzw. 11 TWh an Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen und deren gesamten Ausstoß an CO₂-Äquivalenten präsentiert.

3.1 Windkraftanlagen

Um die vom EAG vorgegebenen zusätzlichen 10 TWh Energie pro Jahr bereitzustellen, benötigt es bis zum Jahr 2030, laut durchgeführter Berechnung mit den in 2.1 beschriebenen Berechnungsgrundlagen, 962 neue Windkraftanlagen in Österreich. Die folgende Tabelle 4 zeigt den Materialbedarf, den Gesamtenergiebedarf zur Materialherstellung und den Gesamtausstoß an CO₂-Äquivalenten um diese Anzahl an Windkraftanlagen zu errichten.

Tabelle 4: Gesamtübersicht der Ergebnisse für den Windkraft-Ausbau (962 neue Windkraftanlagen) bis 2030 inkl. Materialbedarf, Energiebedarf zur Materialherstellung und die anfallenden Emissionen in CO₂-Äquivalenten.

Material	Materialbedarf [t]	Energiebedarf [GJ]	Emissionen [t CO ₂ -ä.]
Zement	1 056 522	4 014 783	623 348
Stahl	465 217	7 908 696	860 652
Kupfer	4130	144 565	24 783
Aluminium	2174	434 783	39 130
Summe	1 528 043 t	12 502 827 GJ	1 547 913 t CO₂-ä.

3.2 PV-Anlagen

Unter der Annahme eines mittleren speziellen Ertrags von 1000 kWh/kW_p und einer mittleren Energiedichte von 0,9 MW pro Hektar (siehe Kapitel 2.2) ergibt sich ein Flächenbedarf von knapp 122 km² um 11 TWh an zusätzlicher Solarenergie in Österreich bereitstellen zu können. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse des Gesamtmaterialbedarfs, des Gesamtenergiebedarfs zur Materialherstellung und der Gesamtausstoß an CO₂-Äquivalenten für die Herstellung der Materialien für den benötigten Ausbau an Solarenergie dargestellt.

Tabelle 5: Gesamtübersicht der Ergebnisse für den PV-Ausbau bis 2030 inkl. Materialbedarf, Energiebedarf zur Materialherstellung und Emissionen in CO₂-Äquivalenten

Material	Materialbedarf [t]	Energiebedarf [GJ]	Emissionen [t CO ₂ -ä.]
Zement	667 700	1 869 560	393 943
Stahl	746 900	14 938 000	1 381 765
EVA	94 600	1 797 400	331 100
Glas	510 400	3 828 000	459 360
Aluminium	82 500	8 085 000	1 485 000
Kupfer	50 600	1 426 920	293 480
Silber	165	247 500	21 780
Summe	2 152 865 t	32 192 380 GJ	4 366 428 t CO₂-ä.

4 Diskussion und Fazit

Im folgenden Kapitel sollen die berechneten Ergebnisse für den Ausbau von Windkraft- und PV-Anlagen diskutiert und interpretiert werden. Der prozentuelle Anteil am gesamten österreichischen Primärenergiebedarf und an den Treibhausgasemissionen von 2019 soll darauf hindeuten, inwieweit das Vorhaben der österreichischen Bundesregierung in diesem Zeitraum umsetzbar ist.

Um den Energiebedarf und Ausstoß an Treibhausgasen (THG) für die Herstellung der Wind- und PV-Anlagen besser einordnen zu können, werden diese mit verfügbaren Daten aus Österreich verglichen. Hier liegt der Primärenergieverbrauch 2019 bei 1050 PJ [20] und die THG-Emissionen bei 79,8 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente [21].

4.1 Limitierung der Berechnung

Bevor die Ergebnisse interpretiert werden, sollen die verwendeten Werte zur Berechnung diskutiert werden. Die Energieintensität und Emissionen der berücksichtigten Materialien setzt sich aus unterschiedlichen Betrachtungen zusammen. Für Stahl wird beispielsweise der Abbau des Roherzes nicht berücksichtigt, während für Aluminium der Bauxitabbau im Energiebedarfswert inkludiert wird. Daher ist die Vergleichbarkeit speziell des Energiebedarfs der einzelnen Materialien sehr limitiert.

Für Windkraft wird der niedrigste Materialbedarf unabhängig von der Turbinenart verwendet. Abweichungen von der Realität entstehen, da nicht berücksichtigt wird welche Turbinentypen am häufigsten verwendet werden. Auch werden wichtige Materialien wie Polymere in dieser Berechnung vernachlässigt. Da dieser Bericht als Grundlage für weitere, detaillierte Berechnungen dienen soll, ist es wichtig diese Limitierungen in zukünftigen Versionen zu berücksichtigen. Wie außerdem im Bericht [2] für den Materialbedarf angemerkt wird, handelt es sich um Durchschnittswerte. Der Materialbedarf nimmt für größere Leistungen nicht zwingenderweise linear zu. Außerdem muss für Windkraftanlagen ein enormer Aufwand betrieben werden, um diese zu errichten. Für den Transport beispielsweise der Rotorblätter an den Aufstellungsort ist oft sogar das Errichten neuer Straßenzüge notwendig. Solche Aspekte sind in diesem Bericht ebenfalls nicht berücksichtigt.

Für PV-Anlagen ist die Art der Module und der Ort der installierten Leistung nicht näher spezifiziert. Abhängig davon können diese Werte von der Realität abweichen.

Die Ergebnisse unterliegen daher signifikanten Limitationen. Der Bericht ist deshalb wie laut Zieldefinition beschrieben, als Berechnungsgrundlage zu verstehen. Basierend darauf können Werte und Annahmen genauer definiert werden. Im Rahmen dieses Berichtes ist daher keine akkurate Abbildung der Realität möglich.

4.2 Windkraftanlagen

Im Jahr 2020 waren in Österreich 1307 Windkraftanlagen in Betrieb [22]. Dementsprechend ambitioniert ist das Ziel der Regierung, diese Anzahl innerhalb von nur 10 Jahren um 962 zu vergrößern. Die in den Berechnungen angenommene Durchschnittsleistung einer geplanten Windkraftanlage von 4,52 MW ist deutlich höher als der tatsächliche Durchschnittswert für bereits bestehende Anlagen in Österreich mit 2,66 MW zu Stand Ende 2022 [16]. Abhängig von der tatsächlichen Größe zukünftiger Windkraftanlagen wird der errechnete Wert dementsprechend abweichen.

Da Wind nicht überall in gleicher Stärke verfügbar ist, stellt die Standortwahl, für die Errichtung einer Windkraftanlage, eine zentrale Rolle hinsichtlich der erzielbaren Leistung dar. Die Auslegung dieser Leistung basiert auf sogenannten Windturbinenklassen. Diese berücksichtigen unter anderem die örtlich vorkommenden mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten. Würde man in der Berechnung, anstatt des gewählten Durchschnittswertes (4,52 MW), geeignete freie Standorte mit Potential für die Errichtung von Neuanlagen mit dazugehörigen Windklassen miteinbeziehen, hätte dies folglich Auswirkungen auf die Berechnung der notwendigen Anzahl der zu bauenden Anlagen.

Vor dem Bau von Windkraftanlagen sind lange Genehmigungsverfahren nötig, in denen die Zulässigkeit der Errichtung von Windkraftanlagen an bestimmten Orten festgestellt wird. Die Genehmigungsverfahren beinhalten unter anderen elektrizitätsrechtliche, naturschutzrechtliche und luftfahrtbehördliche Verfahren [23]. Diese Genehmigungsverfahren können sich teilweise über mehrere Jahre erstrecken. Sollte es zu keiner wesentlichen Beschleunigung dieser Vorgänge kommen ist der erfolgreiche Bau so vieler neuer Windkraftanlagen in unter 10 Jahren in Frage zu stellen.

Eine solche große Zahl an neuerrichteten Anlagen benötigt sehr viel Platz. Darüber hinaus kann es im Zuge des Ausbaus zu Verzögerungen aufgrund von Protesten aus der Bevölkerung kommen, welche sich gegen eine Errichtung neuer Windkraftanlagen richten.

In Tabelle 4 wurden die gesamten Treibhausgasemissionen berechnet, der allein durch die Bereitstellung der vier betrachteten Ressourcen zustande kommt. Da der Fokus der Betrachtung lediglich auf diesen vier Materialien liegt wird der reale Wert bei der Umsetzung den berechneten übersteigen.

Der CO₂-Ausstoß von Österreich im Jahr 2019 betrug 79,8 Millionen Tonnen [21]. Das bedeutet, dass allein die Herstellung der 4 berücksichtigten Materialien ungefähr 2% des CO₂-Jahresausstoßes von ganz Österreich beträgt.

4.3 PV-Anlagen

Für die Bereitstellung von 11 TWh an Solarenergie muss eine Fläche in etwa so groß wie Graz-Stadt mit 126 km² (Stand Dezember 2020: Wikipedia) mit PV-Paneeelen ausgekleidet werden (Berechnungsergebnis in 3.2: 122 km²). Competitive Power Generation GmbH [24] prognostiziert eine Verlangsamung der Ausbauraten auf Dachflächen. Der Firma zu folge, wird der Ausbau auf Freiflächen oder Doppelnutzung von Flächen steigen. Geeignete Grundstücke müssen jedoch gefunden werden, was bei einer so großen Fläche enorme Herausforderungen mit sich bringen wird.

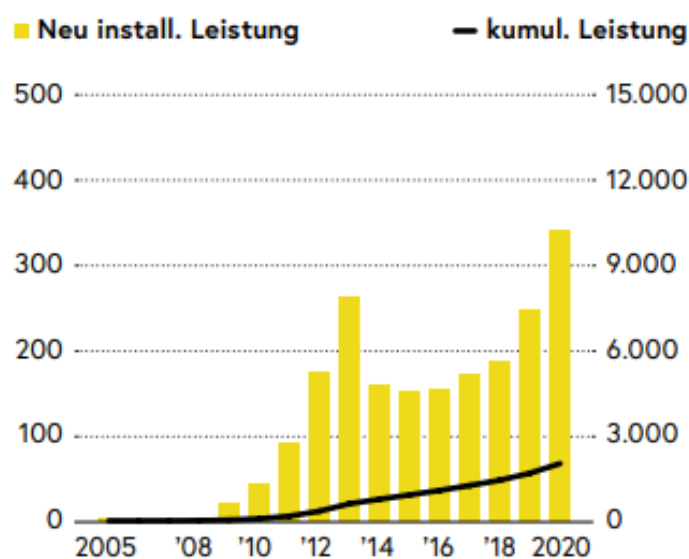
Eine Vielzahl an Materialien ist für die Herstellung von PV-Paneeelen notwendig. Bereits die Herstellung der in diesem Bericht betrachteten Materialien würde knapp 3% des österreichischen Energieverbrauches ausmachen (knapp 30 PJ von 1050 PJ). Der gesamte Ausstoß an CO₂-Äquivalenten für die Errichtung der PV-Paneele ist ebenfalls nicht zu vernachlässigen Knapp 5,5 % des österreichischen Treibhausgas-Emissionen aus dem Jahr 2019 (ca. 4,4 von 79,8 Mio. t) macht die Bereitstellung von 11 TWh Solarenergie aus. Als Vergleichswert dient der prozentuelle Anteil der gesamten österreichischen Abfallwirtschaft aus dem Jahr 2020, welcher 3,1 % der österreichischen Treibhausgasemissionen ausmacht (Wert 2,3 Mio. t) [21]. Dies bedeutet, dass der Ausbau von 11 TWh Solarenergie zu einer fast doppelt so hohen Treibhausgasbelastung führt, als die österreichische Abfallwirtschaft in einem Jahr emittiert.

4.4 Vergleich mit aktuellen Ausbauraten in Österreich

Österreichs Stromverbrauch betrug im Jahr 2020 70,3 TWh [25]. Der Ökostromanteil liegt mit 55,6 TWh bei 79 %. Durch den geplanten Ausbau nach dem EAG kann bis 2030 etwa 83 TWh

Ökostrom jährlich erzeugt werden. Der Stromverbrauch ist über die letzten Jahre angestiegen, und es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend fortsetzen wird. Die Austrian Energy Agency prognostiziert für 2030 einen Verbrauch von 92,3 TWh [26]. Das Umweltbundesamt sagt eine Erhöhung bis 2030 auf 87,3 TWh voraus bis 2050 wird sogar eine Zunahme auf 98,4 TWh erwartet [27]. Zeitgleich findet ein technologischer Wandel, besonders in den Sektoren Verkehr und Industrie, statt. Mit der zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrssektors und ersten Elektrolyse-Einheiten für nachhaltigere Stahlerzeugung kann dieser Anstieg noch höher ausfallen als prognostiziert. Um beispielsweise die österreichische Stahlindustrie zu dekarbonisieren, werden zusätzliche 33 TWh pro Jahr benötigt, was einem Verbrauchsanstieg von 50 % gleichkommt. Dies entspricht etwa 4000 Windkraftanlagen mit jeweils 4 MW Leistung [28].

2020 wurden in Österreich 2 TWh durch PV-Anlagen und 6,8 TWh mittels Windkraft erzeugt. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, erfolgte bei PV-Anlagen im Jahr 2020 ein Zuwachs von 340 MW_p, wodurch die kumulierte Leistung erstmals auf über 2 GW_p anstieg [20].



Quelle: P. Biermayr et al (2021) Innovative Energietechnologien in Österreich – Marktentwicklung 2020; im Auftrag des BMK

Abbildung 2: Jährlich installierte Leistung und kumulierte Leistung von PV-Anlagen in Österreich von 2005-2020 in MW [20]

Wien Energie erklärt dazu, dass das aktuelle Ausbautempo jedoch auf 1100 MW_p pro Jahr steigen muss, um das Ziel von 11 TWh bis 2030 zu erreichen. Dies entspricht einer Verdreifachung der aktuellen Ausbaugeschwindigkeit [29]. Ähnliche Prognosen stellt PV-Austria in einer Hochrechnung in Abbildung 3 an [30]. Diese zeigt ebenfalls, dass die jährliche Ausbaugeschwindigkeit signifikant gesteigert werden muss.

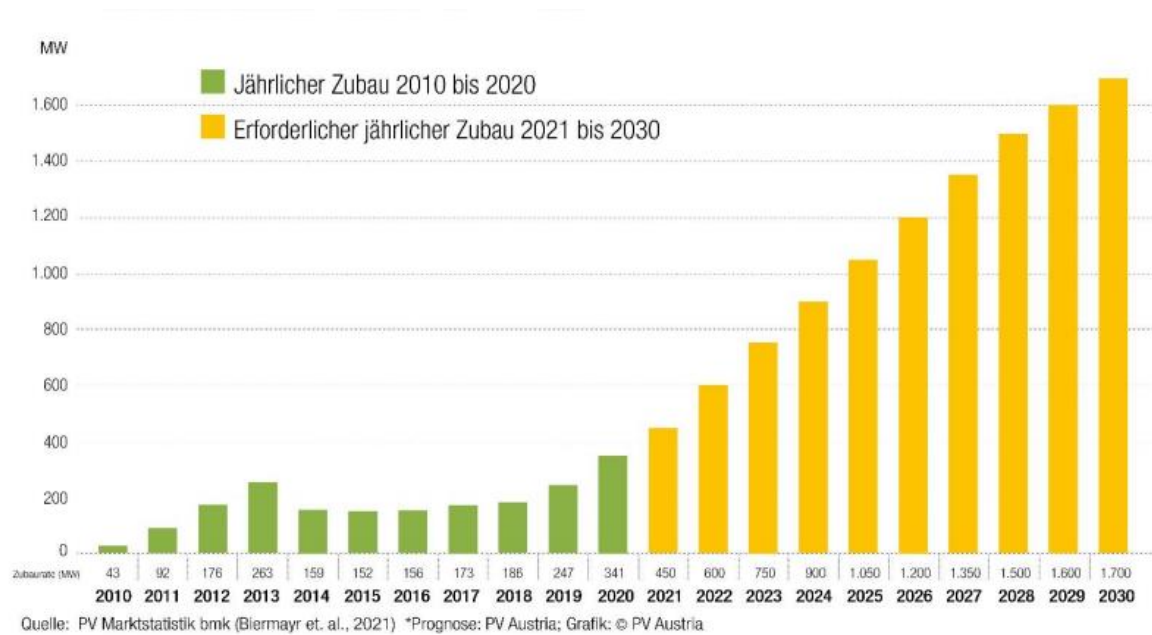
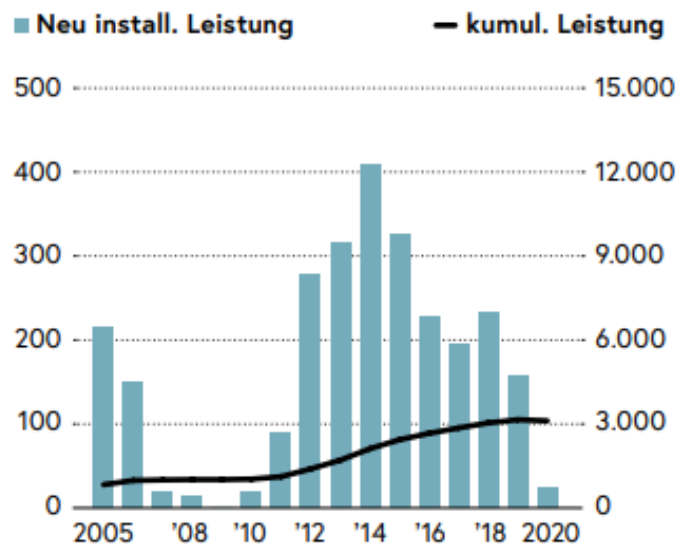


Abbildung 3: PV- Zubau in Österreich 2010-2020 und erforderlicher Ausbau 2021-2030 [30]

Der Zubau von Windkraftanlagen beträgt 2020 25 MW, jedoch wurden im gleichen Jahr 66 MW dekommissioniert. Die gesamt installierte Leistung liegt demnach bei 3,1 GW [20], wie in Abbildung 4 zu erkennen.



Quelle: P. Biermayr et al (2021) Innovative Energietechnologien in Österreich – Marktentwicklung 2020; im Auftrag des BMK

Abbildung 4: Jährlich installierte und kumulierte Leistung von Windkraftanlagen in Österreich von 2005-2020 [20]

Die Untersuchung der aktuellen Ausbauraten zeigt damit, dass diese noch deutlich ansteigen müssen. Inwiefern die Ausbauziele des EAG ausreichen, um einen Ökostromanteil von 100 % bis 2030 zu erreichen ist außerdem stark davon abhängig, wie sich der gesamte Stromverbrauch Österreichs in Zukunft entwickeln wird.

4.5 Fazit

Der Ausbau an erneuerbaren Energien ist wichtig für die Dekarbonisierung des Energiesystems. Jedoch geht dieser auch mit Herausforderungen einher. Nicht nur ist der Materialbedarf für PV- und Windanlagen enorm, sondern er verursacht auch hohe Emissionen. Außerdem ist der Energieaufwand für die Herstellung und den Bau solcher Anlagen nicht zu vernachlässigen. Es ist wichtig solche Parameter für den Ausbau erneuerbarer Energien zu berücksichtigen und auf diese Herausforderungen einzugehen. Dazu muss ein Bewusstsein für dieses „Paradoxon“ geschaffen werden. Dieser Bericht schafft trotz seiner Limitationen einen Überblick über Energiebedarf und Emissionen für die Ausbauziele in Österreich. Für weitere Berechnungen ist jedoch die Berücksichtigung weiterer Materialien und einheitlicher Emissions- und Energiedaten wichtig.

5 Zusammenfassung

Österreich hat es sich mit dem 2021 beschlossenen Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG) zum Ziel gesetzt, bis 2030 einen Ökostromanteil von 100 % vorzuweisen. Die Vorgaben sollen durch einen Ausbau an erneuerbaren Energien von 27 TWh erreicht werden. Diese gliedern sich in 11 TWh PV, 10 TWh Windkraft, 5 TWh Wasserkraft und 1 TWh Biomasse. Der aktuelle Anteil an Ökostrom von aktuell 55,6 TWh soll damit um 50 % gesteigert werden [1].

Mit diesem Ausbauziel geht jedoch ein enormer Materialbedarf einher. Zur Förderung der Rohstoffe, dem Transport und der Weiterverarbeitung der Materialien für Anlagenparks entsteht zunächst zusätzlicher Energiebedarf – das sogenannte „Energy-Paradox“

Als Grundlage für die Berechnungen dient der Bericht Europäischen Kommission [2], in welchem der Materialbedarf für die auszubauenden Technologien abgeschätzt wurde. Der daraus abgeleitete Energiebedarf für die Herstellung der betrachteten Materialien [3-9] führt zu einem Gesamtausstoß an CO₂-Äquivalenten [11-14] für den Ausbau von 10 bzw. 11 TWh an Windkraft und PV-Anlagen.

Um die berechneten Werte (Gesamtenergiebedarf und Gesamtausstoß an CO₂-Äquivalenten) vergleichbar und mengenmäßig abschätzbar machen zu können, wird der prozentuelle Anteil der beiden genannten Werte mit verfügbaren Daten aus Österreich aus dem Jahr 2019 verglichen. Der Primär-Energieverbrauch lag 2019 bei 1050 PJ (= 1 050 000 000 GJ) [20] und die österreichischen Gesamt-Treibhausgasemissionen bei 79,8 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente [21].

Zukünftige Windkraftanlagen werden mit einer Durchschnittsleistung von 4,52 MW und 2300 Volllaststunden betrachtet [15, 16]. Die untersuchten Materialien sind hauptsächlich Baumaterialien (Zement, Stahl, Kupfer und Aluminium).

Bei neuinstallierten PV-Anlagen bis 2030 wird eine konservative Durchschnittsleistung von 0,9 MW pro Hektar angenommen, da derzeit neuinstallierte Anlagen in Deutschland eine durchschnittliche Leistungsbereitstellung von 1 MW_p/ha aufweisen [17]. Weiters wird keine Unterscheidung in der Montageart (an Fassaden, Freiflächen oder Dächern) der neu zu installierenden PV-Anlagen vorgenommen, denn je nach regionalen Gegebenheiten und staatlichen Förderungen können die Anteile an unterschiedlichen PV-Montagearten variieren. Für die Berechnung ist der spezifische Ertrag wichtig, welcher besagt, dass pro Kilowatt-Peak (kW_p) zwischen 800-1100 kWh an Strom gewonnen werden kann. Eine Annahme wird hier mit

1000 kWh/kW_p getroffen. Die untersuchten Materialien für die Herstellung von PV-Modulen sind die folgenden: Zement, Stahl, EVA (Ethylen Vinyl Acetat), Glas, Aluminium, Kupfer, Silber. Vernachlässigt werden Materialien wie Silizium auf Grund von unzureichender Datenlage.

Die Berechnungen zeigen, dass zum Erreichen der vorgegebenen Ziele bis 2030 962 Windkraftanlagen gebaut und eine Gesamtfläche von 122 km² mit PV-Paneelen ausgekleidet werden müssen.

Bezogen auf den Ausbau der Windkraftanlagen ergibt sich dafür ein Gesamtenergieverbrauch (nur aufgrund der Materialintensität) von 12 502 827 GJ und ein Gesamtausstoß an CO₂-Äquivalenten von 1 547 913 t. Der nötige Ausbau an PV-Anlagen fordert außerdem einen Gesamtenergieverbrauch von 32 192 380 GJ und erzeugt einen Ausstoß von CO₂ – Äquivalenten in Höhe von 4 366 428 t. In Summe ergibt das in Folge eine Gesamtausstoß von 5914341 t CO₂ – ä, was in etwa 7,5% des jährlichen Treibhausgasausstoßes von Österreich im Jahre 2019 entspricht [21]. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen 7 und 8 ersichtlich.

Ausgehend von den obigen Ergebnissen sieht man, dass für den Ausbau von Wind- und Solarkraftanlagen umgerechnet weitere 3,4 bzw. 8,47 TWh an Energie bereitgestellt werden müssen. Zum Vergleich: dies ergibt zusammen etwas weniger als die Hälfte der laut EAG geplant auszubauenden Jahresenergiemenge (insgesamt 27 TWh). Hierbei zu berücksichtigen ist, dass dieser Energieaufwand natürlich global verteilt ist und nicht rein durch österreichische Kapazitäten zu decken ist. Außerdem wurden Energie- und Emissionsbeiträge von Transport, Errichtung, zusätzlich notwendiger Rohstoffe (z.B.: Seltene Erden oder Silicium), etc. noch nicht in die Betrachtungen mit aufgenommen. Somit sind die tatsächlichen Emissionen und damit Auswirkungen auf die Umwelt gegebenenfalls höher als hier dargestellt. Der Großteil des Ausstoßes an CO₂-Äquivalenten, nämlich ca. ¾ des Gesamtausstoßes, verursacht der Ausbau der-PV Anlagen. Da die jährlich hinzukommende Stromproduktion aus neuen PV- und Windkraftanlagen (PV: 11 TWh, Wind: 10 TWh) annähernd gleich groß sind, weisen die PV-Anlagen, hinsichtlich ihrer Emissionen, eine längere Amortisationsdauer auf.

Abhängig von den technologischen Entwicklungen in den nächsten Jahren, ist zu erwarten, dass der Strombedarf in Österreich weiter steigen wird [26]. Um einen Ökostromanteil von 100 % bis 2030 zu erreichen, ist somit gegebenenfalls ein Ausbau über die Ziele des EAG hinaus notwendig. Um die aktuell gesetzten Meilensteine zu erreichen muss sich die Ausbaurrate von PV-Anlagen verdreifachen [29], für Windkraft müssen zum österreichischen Gesamtanlagenbestand von 1347 Anlagen 962 neue hinzukommen [22].

6 Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Erfolgreiche Einigung bei Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz*. URL https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/20210706_eag.html#:~:text=7.%20Juli%202021%20Erfolgreiche%20Einigung,Reform%20im%20Energiesektor%20seit%20Ja%20hrzehnten
- [2] CARRARA, S. ; ALVES DIAS, P. ; PLAZZOTTA, B. ; PAVEL, C.: *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*. Luxembourg, 2020
- [3] SUMMERBELL, Daniel L. ; BARLOW, Claire Y. ; CULLEN, Jonathan M.: *Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study*. In: *Journal of cleaner Production* (2016), Nr. 135, S. 1327–1339
- [4] WORLD STEEL ASSOCIATION: *Steel's contribution to a low carbon future and climate resilient society*. Brussels, 2018
- [5] DELOITTE: *Report on Developing Baseline Specific Energy Consumption*. In: *Petrochemical Industry in India* (2013)
- [6] WESTBROEK, Coenraad D. ; BITTING, Jennifer ; CRAGLIA, Matteo ; AZEVEDO, José M. C. ; CULLEN, Jonathan M.: *Global material flow analysis of glass: From raw materials to end of life*. In: *Journal of Industrial Ecology* 25 (2021), Nr. 2, S. 333–343
- [7] SALONITIS, Konstantinos ; JOLLY, Mark ; PAGONE, Emanuele ; PAPANIKOLAOU, Michail: *Life-Cycle and Energy Assessment of Automotive Component Manufacturing: The Dilemma Between Aluminum and Cast Iron*. In: *Energies* 12 (2019), Nr. 13, S. 2557
- [8] CALVO, Guiomar ; MUDD, Gavin ; VALERO, Alicia ; VALERO, Antonio: *Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?* In: *Resources* 5 (2016), Nr. 4, S. 36
- [9] UNEP: *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic metals flows and cycles*
- [10] UMWELTBUNDESAMT: *Klimarelevanz ausgewählter Recycling Prozesse in Österreich : Endbericht*
- [11] WORLD STEEL ASSOCIATION: *Our performance*

- [12] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE: *Aluminum : Information zur Nachhaltigkeit*
- [13] *Baunetz_Wissen : _Beton*
- [14] MAI, Jan-Philipp ; HAASE, Florian: *Rohstoffe in Solarmodulen: CO2-Fußabdruck und Recycling*. 23.Juni 2020
- [15] WINDFAKTEN: *Elektrische Produktion*. URL
https://windfakten.at/?xmlval_ID_KEY%5b0%5d=1236 – Überprüfungsdatum 2023-03-14
- [16] IG WINDKRAFT: *Beschleunigung der Windgeschwindigkeit 2023? : Große Chancen für die Erneuerbaren im neuen Jahr!* URL
<https://windfakten.at/mmedia/download/2023.01.17/1673942588253231.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2023-01-12 – Überprüfungsdatum 2023-03-14
- [17] WIRTH, Harry: *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. 01.03.2023
- [18] JEAN, Joel ; BROWN, Patrick R. ; JAFFE, Robert L. ; BUONASSISI, Tonio ; BULOVIĆ, Vladimir: *Pathways for solar photovoltaics*. In: *Energy & Environmental Science* 8 (2015), Nr. 4, S. 1200–1219
- [19] NASSAR, Nedat T. ; WILBURN, David R. ; GOONAN, Thomas G.: *Byproduct metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios*. In: *Applied Energy* 183 (2016), S. 1209–1226
- [20] BUNDESMINISTERIUM FÜR NACHHALTIGKEIT UND TOURISMUS: *Energie in Österreich : Zahlen, Daten, Fakten*. 2019. Aufl.
- [21] UMWELTBUNDESAMT: *Treibhausgase*
- [22] WINDKRAFT, I. G.: *IG Windkraft - - Wind in Zahlen*. URL
https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY%5b0%5d=1047. – Aktualisierungsdatum: 2021-12-21 – Überprüfungsdatum 2021-12-21
- [23] WINDKRAFT, I. G.: *IG Windkraft - - Bewilligungsverfahren*. URL
https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY%5b0%5d=1238. – Aktualisierungsdatum: 2021-12-21 – Überprüfungsdatum 2021-12-21
- [24] COMPETITIVE POWER GENERATION GMBH: *PV-Freiflächenanlagen als Chance für Grundeigentümer*. URL <https://www.cpg-power.at/pv-freiflaeche/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-01-04 – Überprüfungsdatum 2023-03-14

- [25] STATISTA: *Stromverbrauch in Österreich bis 2020*. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/325788/umfrage/stromverbrauch-in-oesterreich/#:~:text=Stromverbrauch%20in%20%C3%96sterreich%20bis%202020&text=Im%20Jahr%202020%20wurden%20innerhalb,der%20Kraftwerke%20und%20die%20Netzverluste> – Überprüfungsdatum 2022-03-03
- [26] AUSTRIAN ENERGY AGENCY: *Energieszenario für Österreich : Entwicklung von Energienachfrage und Energieaufbringung bis 2030*. URL <https://www.energyagency.at/fileadmin/dam/pdf/projekte/energiewirtschaft/Energieszenario2030-Endbericht-Final.pdf> – Überprüfungsdatum 2022-03-03
- [27] UMWELTBUNDESAMT: *Szenario erneuerbare Energie 2030 und 2050*. URL <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0576.pdf> – Überprüfungsdatum 2022-03-03
- [28] STANDARD: *Neues Verfahren ermöglicht klimafreundliche Stahlherstellung*. Pilotanlage vorgestellt. Interview mit Alexander Rimser
- [29] WIEN ENERGIE: *Photovoltaik-Ausbau in Österreich*. URL <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/photovoltaik-ausbau-in-oesterreich/#:~:> – Überprüfungsdatum 2022-03-03
- [30] PHOTOVOLTAIC AUSTRIA: *Photovoltaik Ausbau auf bisherigem Höchststand - dennoch deutlich zu gering für echte Stromwende : Pressemitteilung*. URL https://pvaustralia.at/wp-content/uploads/2021_06_17_Photovoltaik-Ausbau-auf-bisherigem-Hoechststand-dennoch-deutlich-zu-gering-fuer-echte-Stromwende.pdf – Überprüfungsdatum 2022-03-03