

## **Fossile versus regenerative Energie – sind regenerative Energiequellen nachhaltig?**

### **Gedanken aus der Sicht eines Rohstoffgeologen**

Leopold WEBER (EurGeol), Wien

*office@geologie-weber.at*

#### **Abstract**

It is undisputed that reducing greenhouse gas emissions can help reduce global warming. Since the generation of energy is currently still predominantly based on fossil fuels (coal, crude oil, natural gas) and these raw materials represent the largest greenhouse gas emitters, these are to be replaced by alternative energy sources. However, these new technologies require many times more raw materials. However, in the international bodies the question of the actual availability of the required raw materials or the potential supply risks is not questioned, nor is it examined how the increased demand for raw materials affects the development of greenhouse gases. Even if no physical shortages are to be feared for key raw materials in the medium to long term, artificially induced shortages cannot be ruled out. However, the increasing relocation of raw material production to politically instable countries or countries with low environmental awareness is problematic.

#### **Einleitung**

Es ist unbestritten, dass sich in den letzten Dekaden der Ausstoß an Treibhausgasen (THG) dramatisch erhöhte und merklichen Einfluss auf den Klimawandel hat. So begrüßenswert die Bestrebung von internationalen Organisationen, Regierungen und Wissenschaftern ist, die THG-Emissionen zu begrenzen, sind die auferlegten zeitlichen Ziele schwer erreichbar. Die Haupttreiber für den stark steigenden THG-Ausstoß sind zweifelsohne die Energiewirtschaft und der Verkehr. Eine Reduktion der Emissionen setzt voraus, dass Technologien entwickelt werden müssen, die weniger THG generieren. Dazu zählt die Gewinnung elektrischer Energie aus Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, Geothermie u.a.m. Auf dem Transportsektor wird der Umstieg auf die Elektromobilität propagiert. Die Effektivität der einzelnen Energiequellen wird bisweilen von den jeweiligen Interessensvertretern aber stark überzeichnet.

Der Umstieg auf neue Technologien bedeutet aber auch die Verwendung von anderen, zum Teil seltenen mineralischen Rohstoffen. In der vorliegenden Arbeit wird kritisch diskutiert, ob der Umstieg auf moderne, weniger THG-intensive Technologien risikoarm oder risikobehaftet ist. Da für den Umstieg auf solche Technologien um ein Vielfaches mehr an mineralischen Rohstoffen benötigt wird, ist auch die Frage der THG-Einsparung zu hinterfragen. Der effizienteste Lösungsansatz zur Reduktion der THG-Emissionen ist nach wie vor die persönliche Einschränkung.

#### **Was sind Treibhausgase?**

Unter Fachleuten besteht Einigkeit, dass die Klimaveränderungen in Form der steigenden Temperatur der letzten Dekaden mit dem THG-Ausstoß in direktem Zusammenhang stehen.

Die Erdatmosphäre enthält Gase, die kurzweilige Sonnenstrahlung zum großen Teil passieren lassen, (langweilige) Wärmestrahlung jedoch absorbieren und damit das System erwärmen. In Analogie zu einem Treibhaus – das Sonnenstrahlung durchlässt und Wärmestrahlung „festhält“ – werden diese Gase auch als Treibhausgase (THG) bezeichnet.

Die Wirksamkeit von THG wird als Treibhausgaspotential (THGP) ausgedrückt. Während das THGP von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) mit 1 bemessen wird, ist Methan (CH<sub>4</sub>) in einem Zeitraum von 100 Jahren um das 28 – fache höher. Noch intensiver wirkt Lachgas (N<sub>2</sub>O) mit einem THGP von ca. 298 oder gar fluoridierte THG mit einem THGP von über 13.000. Auf Grund der unterschiedlichen Wirksamkeiten wird die THG-Konzentration in der Atmosphäre in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e) angegeben.

THG sind sowohl geogenen als auch anthropogenen Ursprungs. Geogene Emissionen sind auf die vulkanische Tätigkeit, aber auch natürliche Methanemanationen zurückzuführen. Anthropogen sind die Emissionen aus technogenen Prozessen wie Energiegewinnung, Verkehr, aber auch aus Ackerbau und Viehzucht.

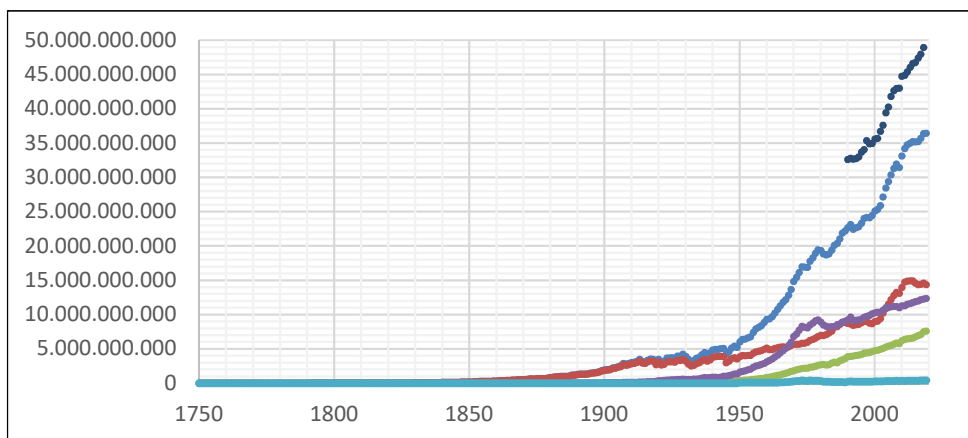


Fig. 1: Treibhausgasentwicklung seit dem Jahre 1750 (Daten: Hannah Ritchie and Max Roser (2020)  
**Blaue Basislinie:** Geogene Emissionen an CO<sub>2</sub>e.; **Grau:** Erdgas; **orange:** Erdöl; **rot:** Kohlen; **blau:** Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle; **gesamt;** **schwarz** gesamte Emissionen (einschl. biogene Energieträger) in CO<sub>2</sub>e.

### Wer sind die Hauptemittenten von Treibhausgasen?

Die sektorale Verteilung der Mengen an THG ist aus Fig. 1 ersichtlich. Rund 35,2 Mrd t, somit rd. 73 % der gesamten THG gehen auf fossile Energieträger zurück, wogegen rd. 14,3 Mrd t, somit rd. 27 % auf andere THG-Emittenten zurückzuführen sind.

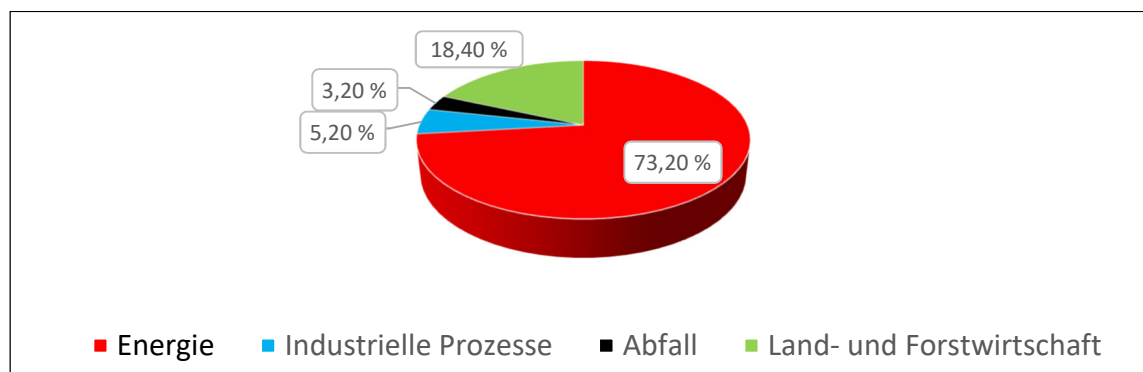


Fig. 2: sektorale Verteilung der globalen THG-Emissionen in %; Datenquelle: Ritchie & Roser (2020)

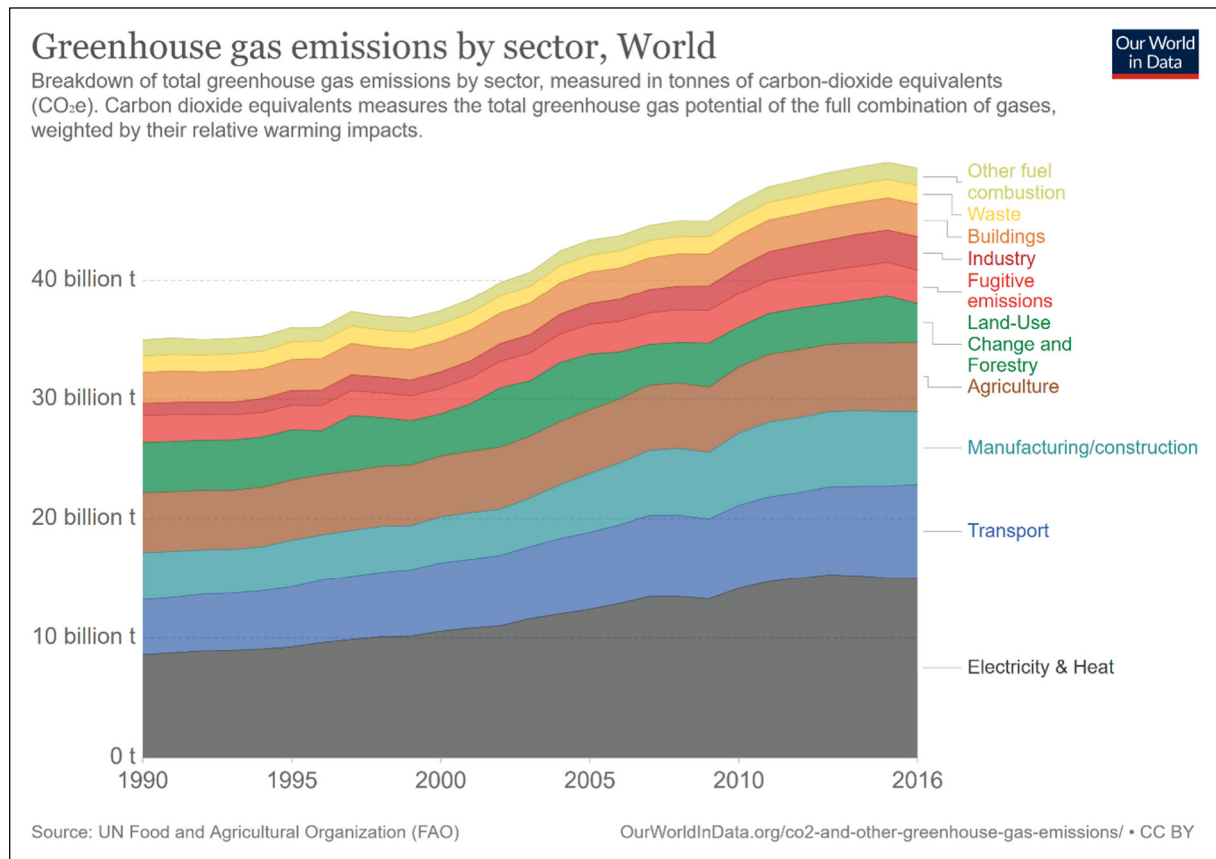


Fig. 3: zeitliche Entwicklung der sektoralen THG-Emissionen. aus: Ritchie & Roser (2020)

## Klimapolitische Maßnahmen

### Pariser Abkommen

Im Pariser Abkommen 2015 einigten sich 195 Teilnehmerstaaten auf ein langfristiges Ziel, den Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur auf **deutlich unter 2°C** gegenüber vorindustriellen Werten, idealerweise auf **1,5°C** zu begrenzen, da dies die Risiken und Folgen des Klimawandels deutlich vermindern würde.

### Europäische Kommission

Durch die Umsetzung des Kyoto-Protokolls nahm sich die Europäische Kommission bereits im Jahre 2000 dieses Problems an. Die Europäische Energiestrategie, die 2007 verabschiedet wurde, sah insbesondere vor, die „20-20-20-Ziele“ bis zum Jahre 2020 umzusetzen:

- 20% Senkung der THG-Emissionen gegenüber dem Stand von 1990
- 20 % der Energie in der EU aus erneuerbaren Quellen
- 20% Verbesserung der Energieeffizienz

In weiterer Folge wurden die Klimaziele kontinuierlich strenger gefasst: So sollte bis zum Jahr 2030 eine Reduktion von 40% der THG-Emissionen unter dem Stand von 1990 erreicht werden. Im August 2018 wurde ein neuer Vorschlag unterbreitet, der eine Senkung des THG-Ausstoßes um 45% (bezogen auf 1990) vorsah. Gleichzeitig wurde eine Erhöhung des Anteils an erneuerbarer Energie am Gesamtverbrauch um

mindestens 27% vereinbart. Zuletzt wurde im April 2021 beschlossen, die THG-Emission bis zum Jahre 2030 um 55% unter den Stand von 1990 zu reduzieren.

Zur Zielerreichung sind alternative Methoden bei der Energieaufbringung erforderlich, wodurch sich aber der Bedarf an bestimmten mineralischen Rohstoffen für die Herstellung von Windturbinen, Photovoltaikanlagen um ein Wesentliches vervielfacht. Dabei erhebt sich die Frage, ob diese Rohstoffe tatsächlich ausreichend verfügbar sind, oder ob wegen der langen Vorlaufzeit von Rohstoffprojekten die Ziele in der knappen Zeit überhaupt erreicht werden können.

## Treibhausgase, Elektromobilität und alternative Energiegewinnung

### Elektromobilität

Vorweg ist festzustellen, dass vollelektrisch betriebene Fahrzeuge zwar keine direkten Emissionen von THG verursachen, die indirekten Emissionen, die unter Heranziehung einer Lebenszyklusanalyse (LCA) bei der Herstellung anfallen, beträchtlich sind. Wie Studien namhafter unabhängiger Institutionen zeigen, ist unter LCA - Betrachtung die Treibhausgasemission von batteriebetriebenen Fahrzeugen (BEV) im Gemischtbetrieb nahezu gleich hoch wie bei Dieselfahrzeugen. Von emissionsfreien Fahrzeugen zu sprechen, ist daher Illusion. Der weitaus größte Teil der THG fällt auf die Herstellung der Batterien. Erst wenn die Energie für die Batterieproduktion aus „Ökostrom“ (Strom ohne fossile Energieträger) bezogen werden kann, ist eine günstigere Bilanz zu erwarten. Derzeit werden aber fast alle Batterien für E-Fahrzeuge von asiatischen Herstellern unter Verwendung von „Kohlenstrom“ erzeugt.

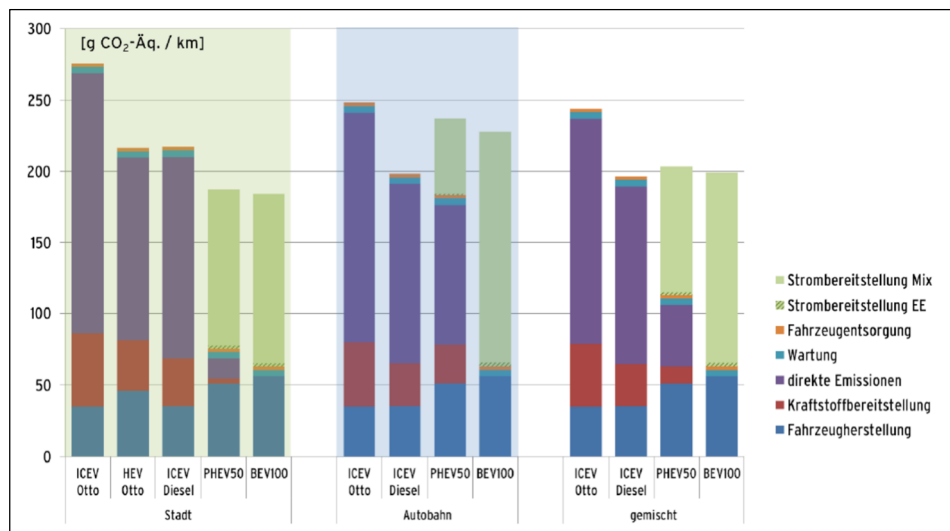


Fig. 4: Treibhausgasemissionen der Fahrzeugkonzepte auf den einzelnen Straßenkategorien (aus: ifeu / UBA-DE 2015: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen)  
Abkürzungen: ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle; HEV: Hybrid Electric Vehicle; PHEV: Plug In Hybrid Electric Vehicle; BEV: Battery Electric Vehicle

Bei der Herstellung eines Fahrzeuges mit Hybrid- bzw. einem Batterieantrieb sind nicht nur eine Reihe von zusätzlichen Spezialmetallen, sondern vor allem wesentlich größere Rohstoffmengen erforderlich (vgl. Tab.3). Dies führt zwangsläufig dazu, dass diese Rohstoffe in verstärktem Ausmaß aus primären und sekundären Rohstoffquellen aufgebracht werden müssen.

Auch der Rohstoffabbau emittiert THG. Diese THG Mengen können nicht leicht reduziert werden. Da aber für die Elektromobilität sowie die Erzeugung alternativer Energie einschl. der dafür erforderlichen Infrastruktur ein Vielfaches der derzeit benötigten Rohstoffe erforderlich ist, wird sich dies auf die geforderte Reduktion der THG-Emissionen bremsend auswirken. Maßgebend dafür ist beispielsweise der wesentlich höhere Bedarf an Aluminium für die Karosserie oder Kupfer für die Motoren und Verkabelungen.

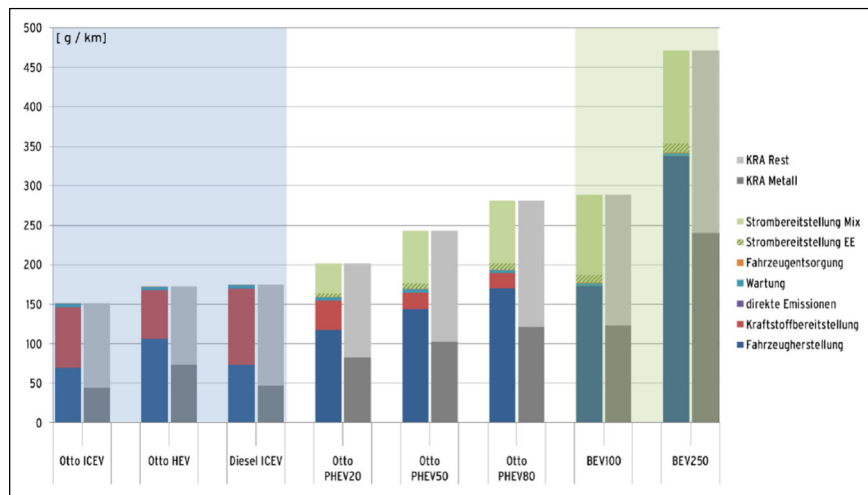


Fig. 5: Kumulierter Rohstoffaufwand nach Lebenszyklusabschnitt und Energieform (168.000 km)  
 (aus: ifeu / UBA-DE 2015: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen);  
 Abkürzungen: siehe Fig. 4

Photovoltaik (PV)

Es steht außer Zweifel, dass die Photovoltaik signifikante Mengen an THG einsparen kann. Einer Studie des deutschen Umweltbundesamtes (UBA 2021) folgend, fallen je nach Paneltyp von US- Herstellern zwischen 17 und 63 g CO<sub>2</sub>e / kWh an. Würden diese Panels in Deutschland hergestellt werden, könnte auf Grund des deutschen Energie-Mix der THG Ausstoß auf 16 – 32 g CO<sub>2</sub>e / kWh reduziert werden. In den südeuropäischen Ländern mit mehr Sonneneinstrahlung können sogar noch günstigere Werte erzielt werden. PV-Anlagen können sowohl direkt beim als auch fern vom Verbraucher errichtet werden. Allerdings ist die PV nicht grundlastfähig.

PV Technologie	THGP der Elektrizität von PV Anlagen in Deutschland (Sonneneinstrahlung 1200 kWh/(m <sup>2</sup> *a) in g CO <sub>2</sub> e / kWh	THGP der Elektrizität von PV Anlagen in Südeuropa (Sonneneinstrahlung 1700 kWh/(m <sup>2</sup> *a) in g CO <sub>2</sub> e / kWh
Moni s-Si (18%)	43-63 (US-Prod)	30-44
	32 (Europ Prod)	22 (Europ Prod)
Multi c-Si (16,8%)	36-47 (US-Prod)	25-33
	29 (Europ Prod)	21 (Europ Prod)
CIGS (14,6%)	24	17
	33 (China Prod)	23 (China Prod)
CdTe (17%)	17-20	12-14
	16 (Europ Prod)	11 (Europ Prod)

Tab. 1: Treibhausgaspotential von PV Anlagen (aus: UBA 2021)  
 US-Prod: Produktion in den USA; Europ. Prod. Szenario einer Produktion in Europa,  
 China Prod. Werte für Produktion in China  
 CIGS: Copper-Indium-Gallium-Selen-Technologie

Windenergie

Treibhausgaspotential	Basisszenario g CO <sub>2</sub> e / kWh Strom, eingespeist in das deutsche Stromnetz	Ergebnisbandbreiten g CO <sub>2</sub> e / kWh Strom, eingespeist in das deutsche Stromnetz
Offshore	7,3	5,4 – 11,8
Onshore (Starkwind)	7,9	6,1 – 11,2
Onshore (Schwachwind)	10,6	5,2 – 11,2

Tab. 2: Treibhausgaspotential von Windkraftanlagen (aus: UBA 2021)

Windenergie emittiert nach einer Studie des deutschen Umweltbundesamtes (UBA 2021) lediglich zwischen 7,3 und 10,6 g CO<sub>2</sub>e / kWh und zählt (scheinbar) zu den saubersten Energiequellen.

Geothermie

Global trägt die Geothermie lediglich 1,3 % zur Stromerzeugung bei. Der überwiegende Teil wird für Heizzwecke herangezogen. Sowohl die tiefe als auch die seichte Geothermie erfordern außer Spezialstählen keine zusätzlichen mineralischen Rohstoffe. Zur Erschließung sind lediglich Bohrungen und die Errichtung der Anlagen erforderlich.

Im Vergleich zur Windkraft und zur Photovoltaik ist beim Betrieb von Geothermieranlagen elektrischer Strom erforderlich, der für die Pumpen benötigt wird und aus dem Stromnetz bezogen wird. Dadurch können zwischen 70 g/CO<sub>2</sub>e bis 100 g/CO<sub>2</sub>e / kWh anfallen (IFEU). Geothermie ist grundlastfähig.

**Das Rohstoffaufkommen mit besonderer Berücksichtigung der Energierohstoffe:**

Bergbau und Landwirtschaft zählen zur Urproduktion. Ohne mineralische Rohstoffe, die ausschließlich durch Bergbau gewonnen werden, ist keine Sachgüterproduktion möglich. Letztere ist wiederum die unverzichtbare Grundlage für den Dienstleistungssektor.

Im Jahre 2019 wurden weltweit rd. 17,9 Mrd t mineralische Rohstoffe (ohne Baurohstoffe wie z.B. Sand und Kies) abgebaut. Rund 15,4 Mrd t, somit 86% entfallen dabei auf die Gruppe der CO<sub>2</sub>e emittierenden Energierohstoffe (Kohlen, Kohlenwasserstoffe, Uran).

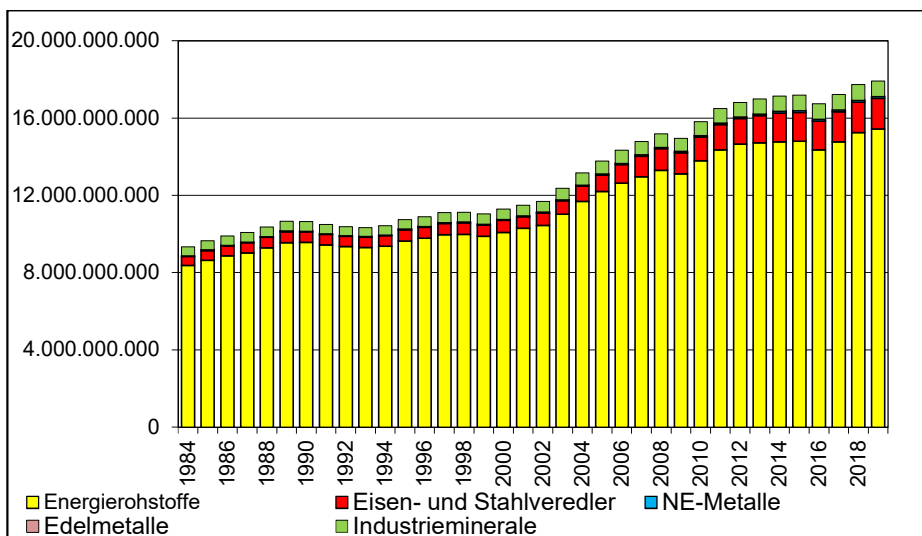


Fig. 6: Weltproduktion von mineralischen Rohstoffen (mit Ausnahme der Baurohstoffe) in metr. t  
Datenquelle: REICHL, C. & SCHATZ, M. (2021): World Mining Data

Auf Grund des unterschiedlichen Energieinhaltes der einzelnen Energierohstoffe und um einen Vergleich mit elektrischer Energie zu ermöglichen, ist vorerst eine Umrechnung in Steinkohleneinheiten (SKE) und schließlich in elektrische Energieeinheiten (Joule) erforderlich (Fig. 7):

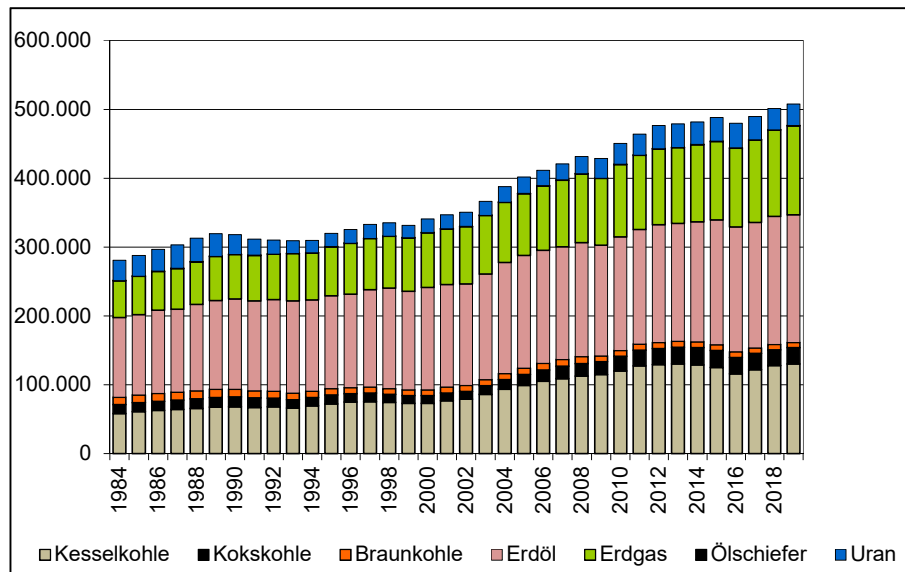


Fig. 7: Weltproduktion von Energierohstoffen in PJ  
 1 Mio t SKE = 29,3076 PJ; 1 PJ = 10<sup>15</sup>J  
 Datenquelle: REICHL, C. & SCHATZ, M. (2021): World Mining Data

Aus Fig. 7 ist deutlich ableitbar, dass unter Betrachtung des Energieinhaltes Erdöl und Erdgas die bedeutendsten Energierohstoffe darstellen.

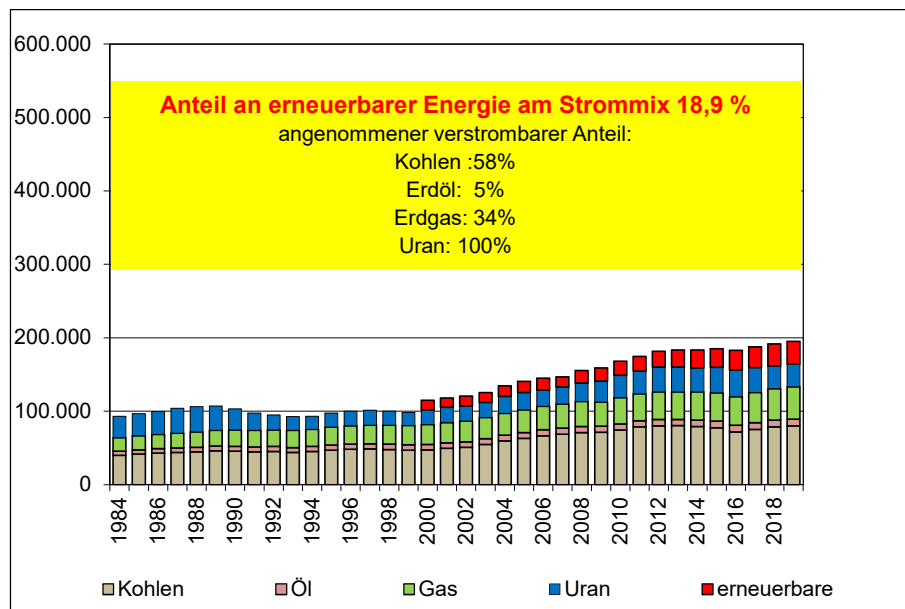


Fig. 8: Verstrombarer Anteil an den fossilen Energierohstoffen und Anteil der erneuerbaren Energie

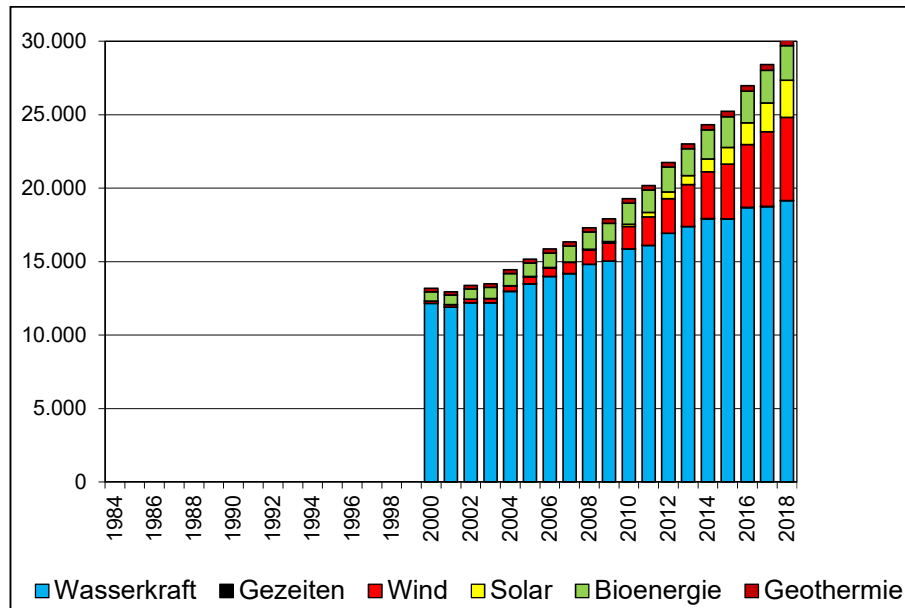


Fig. 9: Anteil der alternativen Energiequellen in PJ (Datenquelle: IRENA)

Unter den nicht aus fossilen Energierohstoffen generiertem Strom ist die Wasserkraft nach wie vor die bedeutendste Quelle für Strom, gefolgt von der Windkraft mit merklich steigendem Anteil (Fig. 9).

### Alternative Energie ist rohstoffintensiv!

#### Rohstoffaufwand für die Elektromobilität

Der VW-Käfer der frühen 1980-er Jahre bestand im Wesentlichen aus einer einfachen Stahlkarosserie, einem Motor mit Vergaser ohne Abgaskatalysator und einer Starterbatterie aus Blei. Das Gewicht des Fahrzeuges lag bei ca. 800 kg.

Mitte der 1980-er Jahre wurden die ersten Abgaskatalysatoren eingesetzt, wobei zunehmend auch elektronische Bestandteile Verwendung fanden, die in erster Linie Edelmetalle benötigten.

Mit der Entwicklung von Fahrzeugen mit Hybridantrieb, insbesondere aber vollelektrischen Fahrzeugen war es notwendig, Hochleistungsbatterien (zumeist auf Lithium-Basis) einzusetzen. Das hohe Gewicht dieser Batterien (200 - 300 kg, bis zu 750 kg für einen Tesla S) zwang aber, beim Gewicht des Fahrzeugs einzusparen. Dies wird beispielsweise durch eine leichte Aluminiumkarosserie bewerkstelligt. Für den Elektroantrieb sind leistungsstarke Elektromotoren erforderlich, die einen Mehraufwand an Kupfer hervorrufen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass, wie verschiedene Studien zeigen, ein wesentlich höherer Bedarf an mineralischen (zumeist metallischen) Rohstoffen besteht, als für Fahrzeuge mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren. Da auch bei der Gewinnung und Verarbeitung dieser mineralischen Rohstoffe THG entstehen, drückt sich dies auch in der THG Bilanz markant aus.



	Vor 40 Jahren Otto/Diesel	Heute Otto/Diesel	Hybrid NiMH	BEV	Fuel Cell
Gewicht	800 kg	1500 kg	1100 kg	1600 kg	
Stahl			850 kg *	750 kg *	
Alu			115 kg *	200 kg *	
Kupfer		23 kg *	40 kg *	83 kg *	
PGM		9,1 g *	6,4 g *	-- *	
		2-6 g **	2-6 g **	-- **	25-35 g **
Au			0,2 g *	0,3 g *	
REE	--	247 g *	21 000 g *	1 100 g *	
Ga	--	0,4g *	0,8 g *	1,1 g *	
Li	--	1,36 g *	1,36 g *	7 700 g*	
Co	--	--	0,8 kg *	0,9 kg *	
Ni	3-4 kg **	3-4 kg **	5-15 kg **	<b>30-110 kg **</b>	2-3 kg **

Tab. 3: Rohstoffaufwand von Fahrzeugen verschiedener Antriebsarten  
Quellen: \* ORTEGO et al. 2018; \*\* NORISLK Homepage 2018;

### Rohstoffaufwand für die Windenergie

Der Rohstoffaufwand für eine Windturbine scheint überschaubar gering zu sein. Für Hochleistungsanlagen (z.B. Anlagen mit > 3MW Nennleistung) sind jedoch beachtliche Mengen an Selten-Erdelementen erforderlich. Die Permanentmagnete der Generatoren bestehen aus NdFeB Speziallegierungen mit rd. 66% Fe, 29% Nd, 3% Dy, 1% B. Der Nd-Bedarf für getriebelose Generatoren, liegt bei rd. 200 kg/MW, wogegen für Generatoren mit Getrieben für mittlere Windgeschwindigkeiten rd. 50 kg /MW, für solche mit hoher Windgeschwindigkeit ca. 35 kg erforderlich sind.

Teil	Roh- und Grundstoffe
Rotorblätter	Verbundwerkstoffe,
Generator	REE, B, Co, Cu, Fe
Getriebe	Fe, Cr, Mo, Ni, Cu
Gondel	Al, Cu, Fe, Mo, Ni
Turm	Al, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni
Fundament	Fe, Beton
Leitung	Cu, Pb

Tab. 4a: erforderliche Rohstoffe für  
Windkraftanlagen

Roh-/ Grundstoff	Onshore Menge in t für Windrad mit 3 MW	Offshore Menge in t für Windrad mit 12 MW
Beton	1207	103
Stahl	355	2287
Fe	31	134
Al	2,6	49
Cu	4,6	82
Pb	0	177
Zn	0,3	60
Kunststoffe	39	216
Neodym	186 – 558 kg	744 – 2232 kg
Dysprosium	12-72 kg	48 – 288 kg
	Ca. 1640 t	Ca. 3100 t

Tab. 4b: spezifischer Rohstoffbedarf für ein Windrad  
(nach WATZEL, M. 2015, umgerechnet in t

Dabei wird meist übersehen, dass Windkraftanlagen oft an Orten errichtet werden müssen, wo keine kurzen Anbindungen an das öffentliche Stromnetz möglich sind. Die Lebenszyklusanalyse und somit der tatsächliche Rohstoffaufwand für eine Windkraftanlage ist daher leider oft unvollständig, weil die Leitungen ins öffentliche Netz nicht berücksichtigt werden. Dabei fallen beachtliche Mengen an Kupfer oder Aluminium für die Stromleitungen an. Beispielsweise werden für den Windkraftpark Pretul-2 in der Oststeiermark für die 30 kV Erdkabelleitungen längswasserdichte VPE-isolierte Erdkabel der Type NA2XS(F)2YV 3x1x240 mm<sup>2</sup> benötigt. Allein für die Energieableitung in das öffentliche Stromnetz war die Errichtung einer etwa 9 km langen, erdverlegten Aluminium-Doppelkabelleitung des Typs NA2XS2Y 3x1x630 mm<sup>2</sup> erforderlich.

Der Rohstoffbedarf für Kabel dieser Dimension ist enorm. So kann allein das Gewicht des Kupferleiters bis zu 7 t / km bzw. bei Aluminium bis zu 3 t / km im Einzelkabel betragen. Bei drei Kabeln fallen somit pro km bis zu 21 t Cu bzw. 9 t Aluminium an! Die Länge der Stromleitungen in der Nordsee kann bis zu 100 km betragen.

#### Rohstoffaufwand für Photovoltaik (PV)

Der Rohstoffbedarf für eine Solarzelle ist überschaubar. Neben Glas und Aluminium als Trägerstoffe werden vorwiegend Si, Cu und Ag benötigt. Für die immer wichtiger werdende Dünnschichttechnologie besteht allerdings ein merklich zunehmender Bedarf an Nebenmetallen wie In, Se, Ga, Ge, Cd und Te.

Für ein Solarmodul a' 18 kg sind ca. 12,9 kg Glas, 2,3 kg Aluminium, 1,8 kg Kunststoffe, 0,7 kg Silizium, 0,2 kg Kupfer und 0,02 kg Silber erforderlich. Während für Aluminium, Kupfer und Silber gute Informationen über die Verfügbarkeit bestehen, liegen solche für die Nebenmetalle nur unzureichend vor. Dies liegt vor allem in der Tatsache begründet, dass diese Metalle keine eigenen Lagerstätten bilden, sondern als „Verunreinigungen“ in bestimmten Wirtsmineralen, insbesondere in Zinkblenden auftreten. Diese Metalle reichern sich bei der Verhüttung in Anodenschlämmen an, die aber nur zum Teil zur weiteren Wertstoffgewinnung herangezogen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass der weitaus größte Teil dieser Metalle unwiederbringlich als Sonderabfall verloren geht.

In Österreich sind nach Angaben des BMLRT rd. 1.700 MW in PV Anlagen installiert. Dies entspricht rd. 1,7 TWh Strom = 6,12 PJ. Um das Ausbauziel 2030 gem. EAG („Erneuerbaren Ausbau Gesetz“) von 12 TWh zu erreichen, müssten unter Anwendung der effizientesten Technologien (Dünnschichtphotovoltaik) bestimmte Metalle wie In, Ga und Ge vermehrt verwendet werden. Stellt man die dafür benötigte Menge an solchen Metallen der derzeitigen Weltproduktion gegenüber, ergibt sich, dass allein der österreichische allein den Weltmarkt bei Germanium überfordern würde...

Be- darf/ Jahr	In	Se	Ga	Cd	Te
2010	10	6	9	5	2
2020	50	29	44	57	25
2030	285	165	251	336	148
2040	430	249	378	511	225
2050	580	336	510	687	303
Prod. 2020	835	2998	323	24465	647

Tab. 5a: globaler Rohstoffbedarf für PV

Bedarf 2030 Masse in t	Bedarf per anno in metr. t	Weltprod. 2019 in metr. t
Si 42.000	5.250	n.b.
In 325	40	896
Ga 78	10	374
Ge 533	66	95 (!)

Tab. 5b: österr. Rohstoffbedarf für PV

### Rohstoffaufwand für Geothermie

Verglichen mit den anderen alternativen Energiequellen ist die Nutzung der geothermalen Energie am wenigsten rohstoffintensiv. Der Rohstoffbedarf beschränkt sich auf die Bohr- und Rohrstränge sowie die Wärmepumpen. Von der Tiefe (und somit Länge) der Verrohrung hängt auch der Rohstoffaufwand ab.

### **Rohstoffe für alternative Energie und deren Versorgungsrisiken**

Die Umstellung der derzeitigen Energieerzeugung von fossilen Energierohstoffen zu solchen aus erneuerbaren Quellen setzt voraus, dass künftig andere und vor allem auch mehr mineralische Rohstoffe durch den Bergbau aufgebracht werden müssen. Dies wird sich auf die THG-Bilanz auswirken: In den folgenden Kapiteln wird dargelegt, wie sich die Umstellung auf andere „grüne“ Rohstoffe bilanzmäßig auswirken kann.

Die Akzeptanz der Bevölkerung für eine Rohstoffgewinnung ist zumindest im europäischen Raum sehr beschränkt. Aber auch in Entwicklungsländern wird eine künftige Rohstoffgewinnung durch Bürgerinitiativen zunehmend erschwert (z.B. Lithium in Südamerika). Aus diesem Grunde wird auch geprüft, ob, bzw. mit welchen Risiken Rohstoffe, exemplarisch analysiert am Beispiel von Kupfer, Lithium und Grafit bereitgestellt werden können

### **Rohstoffgewinnung und Treibhausgase**

Der Bergbausektor wird oft kritiklos als einer der größten Emittenten von THG weltweit angesehen (Rüttinger, L. Sharma, V. 2016). Nach Delevingne, L., et al. (2000) trägt der Bergbau aber „nur“ zwischen 4 und 7% am globalen THG-Ausstoß bei. Dabei stammt der überwiegende Teil der THG (3 – 6 %) von flüchtigem Methan im Zuge der Gewinnung von Kohle, was einer Menge von ca. 1,5 bis 4,6 Mrd t CO<sub>2e</sub> entspricht. Der für die Gewinnung erforderliche Energieaufwand ist mit rd. 0,4 Mrd t CO<sub>2e</sub> vergleichsweise gering. Zum Vergleich: Nach RITCHIE, H & ROSER, M. (2020) werden durch die Landwirtschaft 18,4% an THG, das sind rd. 9,1 Mrd t CO<sub>2e</sub> emittiert.

Fälschlicherweise werden gelegentlich auch die THG-Emissionen der Kohleverstromung dem Bergbau zugeordnet. Gleiches gilt für die Stahlherstellung. So fallen allein rd. 4,2 Mrd t CO<sub>2e</sub> auf die energieintensive Stahl- und Aluminiumproduktion. Aus Koks-kohle, die für die Stahlerzeugung erforderlich ist, werden nach eigenen Berechnungen rd. 2,2 Mrd t CO<sub>2e</sub> emittiert. Bei der Verstromung der Kohle werden rd. 10 Mrd t CO<sub>2e</sub> freigesetzt (IEA 2019). Eigene Schätzungen ergeben „lediglich“ ca. 7,7 Mrd t CO<sub>2e</sub>.

Tatsächlich ist die globale THG-Emission des Bergbaus nicht einfach zu ermitteln. Der Ausstoß von THG durch den Bergbausektor ist primär von der Gewinnungsart (Tagbau / Untertagebergbau) und den Wertstoffgehalten der Lagerstätten abhängig. Der Untertagebergbau ist energieaufwändiger als ein Tagbau, was sich unmittelbar im THG-Ausstoß manifestiert. Rohstoffe, die nur in geringen Konzentrationen vorliegen (z.B. Au), verursachen darüberhinaus einen signifikant höheren THG-Ausstoß als solche, die in hohen Konzentrationen (z.B. Fe) vorliegen. Aus diesem Grunde ist eine Abschätzung des globalen THG Ausstoßes und ein Vergleich mit anderen Emittenten nicht leicht möglich.

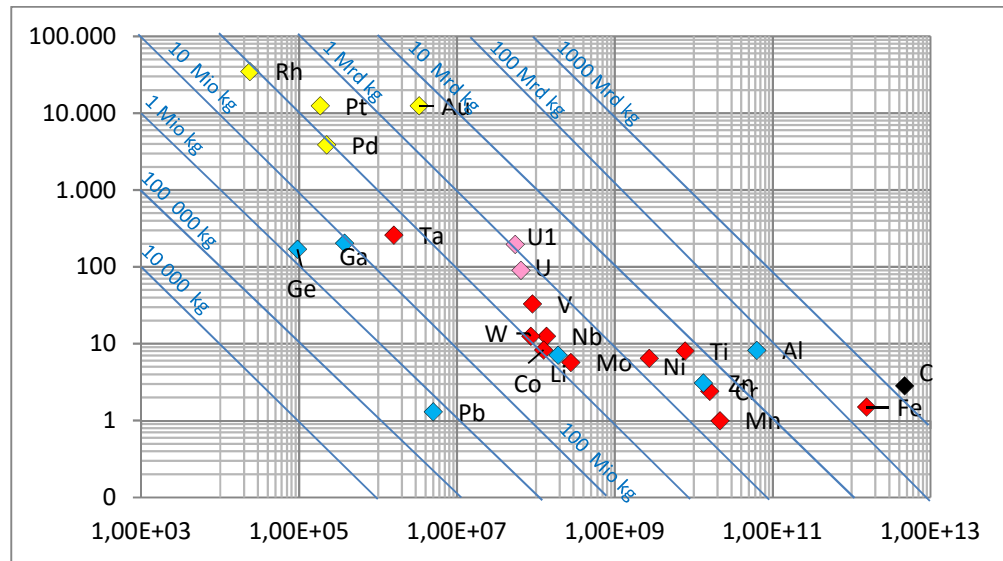


Fig. 10: Menge des Treibhausgasausstoßes in kg nach Rohstoffen; horizontale Achse: Rohstoffproduktion 2019 in kg Wertstoff (Datenquelle: REICHL, C. & SCHATZ, M. 2021); Vertikale Achse: THG Emissionen in kg CO<sub>2e</sub> gelb: Edelmetalle, blau: Bunt- und Sondermetalle, rot: Eisen und Stahlveredler (Datenquellen: Nuss, P. et al. 2014; Azadi, M., et al. 2020; Taylor, M. 1997, Kohlen: eigene Berechnungen)

Fig. 10 gibt zumindest die Größenordnung der THG Emissionen in Kilogramm CO<sub>2e</sub> je Kilogramm Wertstoff an. Dabei zeigt sich deutlich, dass Bergbaue mit höheren Wertstoffgehalten weniger THG emittieren als solche mit geringen Wertstoffkonzentrationen, zumal weniger Gesteinsmassen gefördert und verarbeitet werden müssen. Demgegenüber müssen bei extrem geringen Wertstoffgehalten, wie z.B. Edelmetallen enorme Mengen an Hauwerk bewegt und verarbeitet werden. Die in Fig. 10 dargestellten Mengen an CO<sub>2e</sub> für Kohlen entsprechen lediglich dem verstromten Anteil. Die Menge an CO<sub>2e</sub> für Eisen enthält auch die durch Koks-kohle freigesetzten THG.

Die Angaben der THG-Emissionen pro Wertstoffeinheit sind aber grundsätzlich sehr kritisch zu hinterfragen. Beispielsweise gehen die enormen technischen Aufwendungen bei der Suche nach Lagerstätten (z.B. Suchbohrungen) nicht ein. Offensichtlich werden auch die Transportwege von der Hütte zum Verbraucher nicht berücksichtigt. Es ist daher durchaus von höheren THG-Emissionen / Wertstoffeinheit als angegeben auszugehen. Von Interesse ist aber, wie sich der THG-Ausstoß durch den steigenden Rohstoffbedarf entwickeln wird. Jene mineralischen Rohstoffe, die insbesondere für die alternative Energiegewinnung erforderlich sind (Cr, Co, Mn, Mo, Ni, Nb, Ta, Ti, V, W; Ag, Pt; As, B, C, Cd, Cu, Ga, Ge, Hf, In, Ir, Li, Mg, Pb, REE, Se, Si, Sn, Te, Zn, Zr), verursachten im Bezugsjahr 2020 THG-Emissionen im Ausmaß von „lediglich“ ca. 44 Mio t. Zum Vergleich: Allein der CO<sub>2e</sub> Ausstoß durch die verstromte Kohle beträgt rd. 7,7 Mrd t. Berücksichtigt man den bis zum Jahr 2040 steigenden Bedarf an diesen Rohstoffen, erhöht sich der THG-Ausstoß auf ca. 188 Mio t. Gemessen am gesamten THG-Ausstoß 2020 trägt somit der Bergbau auf diese Rohstoffe lediglich mit ca. 0,24 % bei.

## Analyse der mittel- bis langfristigen Verfügbarkeit und der Versorgungsrisiken von ausgewählten Schlüsselrohstoffen (Cu, Li, Grafit)

Der Umstieg der Energiegewinnung aus fossilen Rohstoffen zu solchen aus erneuerbaren Energiequellen drückt sich insbesondere darin aus, dass nicht nur verschiedene mineralische Rohstoffe, die bereits derzeit verwendet werden, künftig vermehrt benötigt werden, sondern aber auch Rohstoffe, die bislang nur in geringem Maße eingesetzt wurden, zunehmend an Bedeutung gewinnen werden.

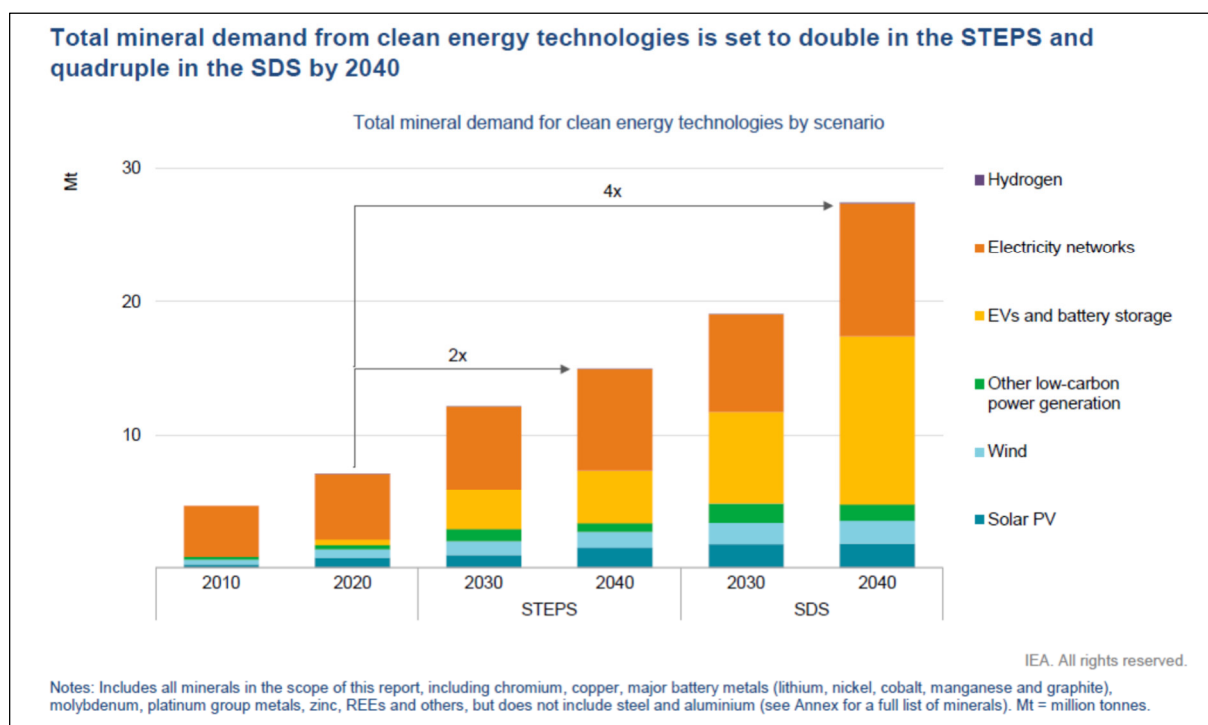


Fig. 11: Rohstoffbedarf für erneuerbare Energie. aus IEA (2021)  
Abkürzungen: STEPS: Stated Policies Scenario; SDS: Sustainable Development Scenario

Mineralische Rohstoffe sind in Lagerstätten angereichert, die durch Bergbau nutzbar gemacht werden. Lagerstätten sind standortgebunden und nur in geologischen Zeiträumen erneuerbar. In der Endlichkeit der Ressourcen und der geringen Akzeptanz in der Bevölkerung für Bergbau liegt eines von vielen Kernproblemen einer ausreichenden Versorgung mit Rohstoffen. Aus Fig. 11 wird augenscheinlich, wie sehr sich der Bedarf an Rohstoffen mittel- bis langfristig ändern wird.

Kupfer ist sowohl für die Elektromobilität als auch für alternative Energiequellen ein Schlüsselrohstoff. Ein E-Mobil benötigt im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsantrieb nahezu die vierfache Menge an Kupfer. Somit wird ganz offensichtlich der Elektromobilität und der Leitungsinfrastruktur die größte Bedeutung zukommen. Aus diesem Grunde sollen die möglichen Versorgungsrisiken bei Kupfer und den beiden „Batterierohstoffen“ Lithium und Grafit näher beleuchtet werden.

In den folgenden Kapiteln werden die Ressourcen (Eigenerhebungen, zumal die Angaben des USGS z.T. fragwürdig sind) mit sozioökonomischen Indizes wie politische Stabilität der Produzentenländer (World Governance Index der World Bank) bzw. dem Environmental Performance Index (EPI) der Yale University (Wendling, Z. A., et al. 2020) verknüpft.

### Kupfer

Nach eigenen Erhebungen betragen die globalen Ressourcen der produzierenden Bergbaue rd. 1.777,5 Mio t Cu Metall. Bei gleichbleibender Produktion würde die Reichweite bei rd. 86 Jahren liegen. Unter Berücksichtigung der laufenden Explorationsvorhaben würden sich die Ressourcen sogar um weitere 36 Jahre erhöhen, vorausgesetzt, dass alle Projekte wirtschaftlich umgesetzt werden können. Der Bedarf an Kupfer für die modernen Technologien ist stark steigend und soll im Vergleich zum Bezugsjahr 2020 bis 2040 um das 2,65-fache ansteigen (IEA 2021).

Fig. 12 zeigt, dass von den zahlreichen Explorationsprojekten lediglich ein Bruchteil wirtschaftlich zu einem Bergbau weiter entwickelt werden konnte. Es wurden ca. 2800 Rohstoffprojekte, die seit 2007 durchgeführt wurden, auf ihren Erfolg untersucht. Davon fielen rd. 440 auf Kupferprojekte. Aus diesen resultierten lediglich 5 konkrete Bergbaue. Hieraus zeigt sich das enorme wirtschaftliche Risiko bei der Erschließung neuer Lagerstätten und dass nur ein Bruchteil der aus Explorationsvorhaben ermittelten Ressourcen tatsächlich nutzbar gemacht werden kann.

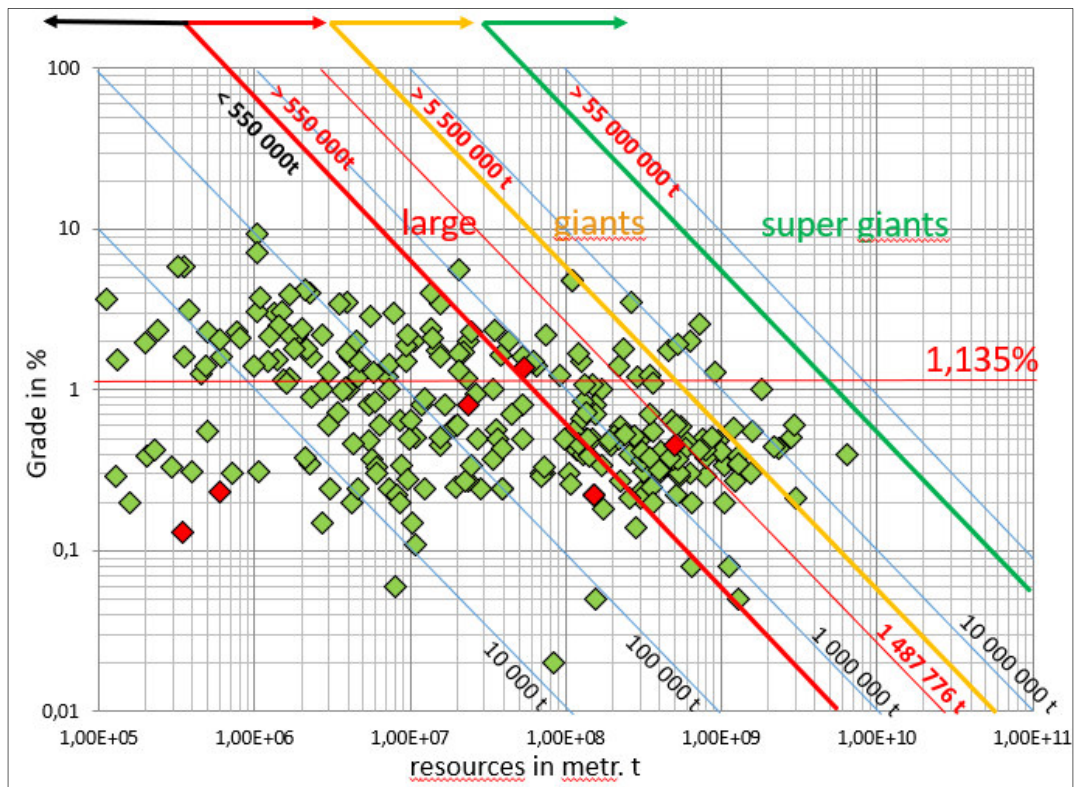


Fig. 12: Gegenüberstellung des Umsetzungserfolges von Explorationsprojekten auf Kupfer:  
 grün: Projekte, die zu keinem wirtschaftlichen Erfolg führten;  
 rot: aus Explorationsprojekten erfolgreich umgesetzte Bergbaue  
 Datenquelle: eigene Erhebungen aus den Geschäftsberichten der Unternehmen

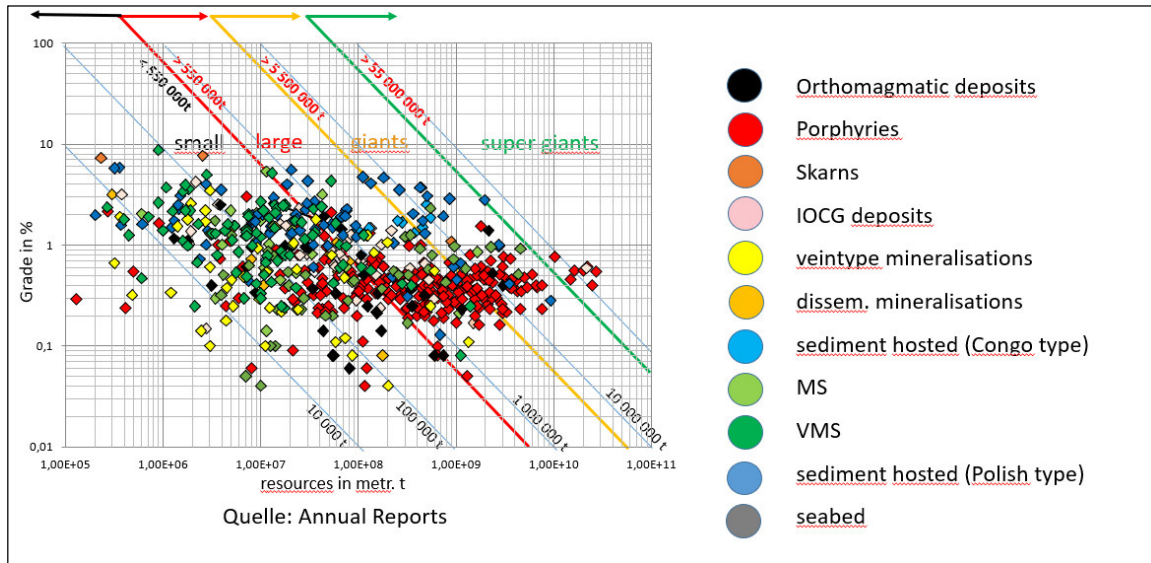


Fig. 13: globale Kupferressourcen (produzierende Betriebe nach Größe und Lagerstättentyp (Eigene Erhebungen aus Unternehmensberichten)

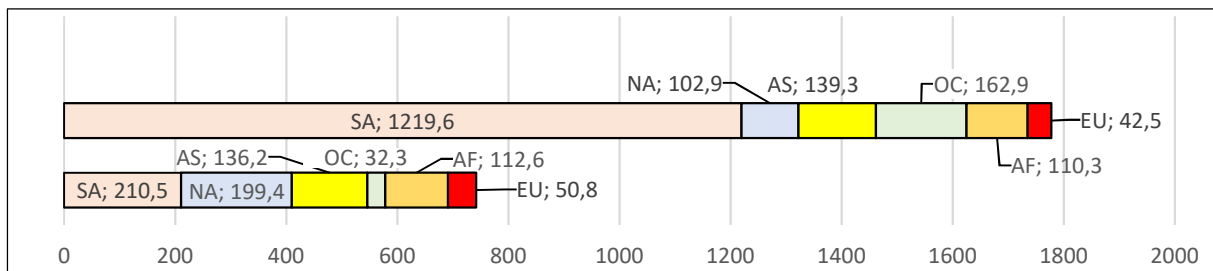


Fig. 14: Verteilung der globalen Cu Ressourcen nach Kontinenten in Mio t (eigene Berechnungen)  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe (1.777,5 Mio t Cu)  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben (751,6 Mio t Cu)

Aus der Fig. 14 ist deutlich erkennbar, dass die Explorationsvorhaben insbesondere auf dem südamerikanischen Kontinent stark rückläufig sind.

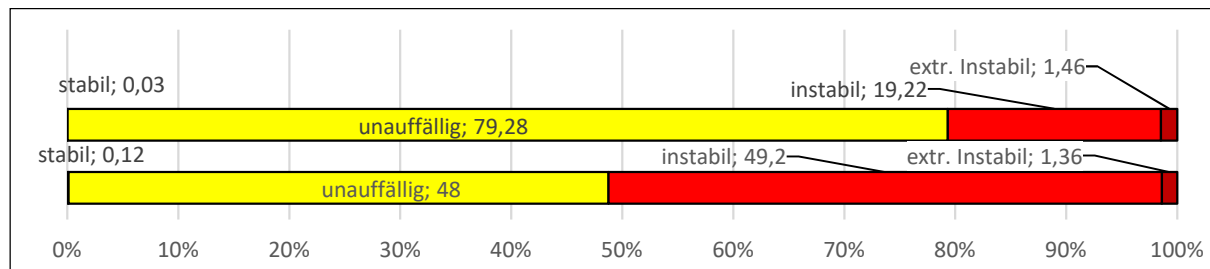


Fig. 15: Verteilung der globalen Cu Ressourcen nach politischer Stabilität der Produzentenländer in %  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben  
 (Quellen: Ressourcen: eigene Berechnungen; pol. Stabilitätsindizes: WGI)

Die Fig. 15 zeigt deutlich, dass sich die Explorationsvorhaben zunehmend auf politisch instabile Länder verlagern.

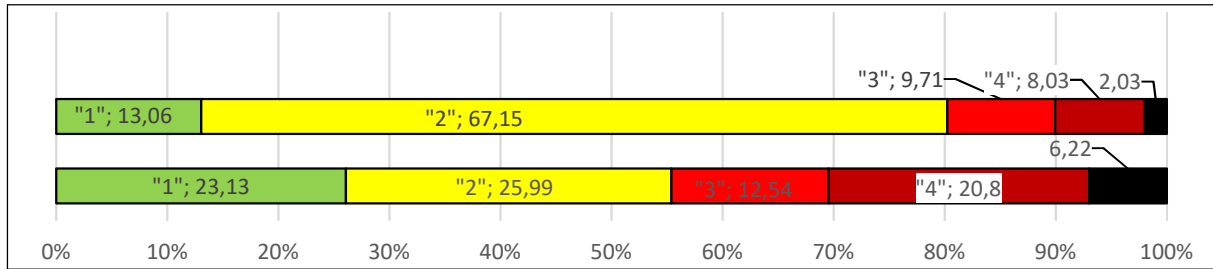


Fig. 16: Verteilung der globalen Cu Ressourcen nach Umweltperformance der Produzentländer in %  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben  
 (Quellen: Ressourcen: eigene Berechnungen; Environmental Performance Index: Wending, Z. A., et al. 2020)

Die Wertung 1 – 5 entspricht dem Schulnotensystem

Unschwer ist zu erkennen, dass die Explorationsvorhaben sich in Länder mit deutlich geringerem Umweltschutz verlagern.

Mit Sorge ist darüberhinaus die Entwicklung der Cu-Preise an den Börsen zu verfolgen. An der LME (London Metal Exchange) ist dieser von Jahresmitte 2020 von rd. 6500 US\$/t bis Jahresmitte 2021 auf rd. 9500 US\$/t angestiegen. Kurzfristig notierte Kupfer an der LME sogar über 10.000 US\$/t. Die Rohstoffpreise werden sich zwangsläufig in den Energiekosten bzw. Produkten niederschlagen.

## Lithium

Die größten Mengen an Lithium werden künftig für die Batterien der BEV (Battery-Electric Vehicles) benötigt. Die globalen Ressourcen der produzierenden Bergbaue liegen nach eigenen Berechnungen bei rd. 31,835 Mio t Li, das entspricht rd. 68,540 Mio t Li<sub>2</sub>O bzw. 169,489 Mio t LCE (Lithium-Carbonate-Equivalents). Bei gleichbleibender Produktion resultiert daraus eine Reichweite von ca. 360 Jahren. Der Explorationsboom auf Lithiumlagerstätten spiegelt sich deutlich in den Ressourcenangaben wieder. Die bedeutendsten Neufunde ergaben sich in Süd- und Nordamerika. Durch die Explorationsvorhaben wurden bislang rd. 60,824 Mio t Li nachgewiesen. Sofern auch alle Projekte wirtschaftlich umgesetzt werden können, würden Ressourcen für zusätzlich rd. 690 Jahre zur Verfügung stehen.

Rund 54,8 % der globalen Lithiumressourcen stammen aus Salzsolen („Brines“), der Rest ist an Festgesteine gebunden. Fig. 17 zeigt die Größe der einzelnen Li-Vorkommen nach Lagerstättentyp. Unschwer ist zu erkennen, dass die lithiumhaltigen Salzsolen zwar geringe Li-Konzentrationen aufweisen, sich aber durch ihre große Dimension auszeichnen. Demgegenüber sind die „Hard-rock“ Vorkommen (Pegmatite, Greisen, lithiumhaltige Tone etc) durchwegs reicher an Li, aber wesentlich kleinvolumiger.

Der Bedarf an Lithium für die Energiespeicherung ist stark steigend und soll im Vergleich zum Bezugsjahr 2020 bis 2040 um das 41-fache (!) ansteigen (IEA 2021).



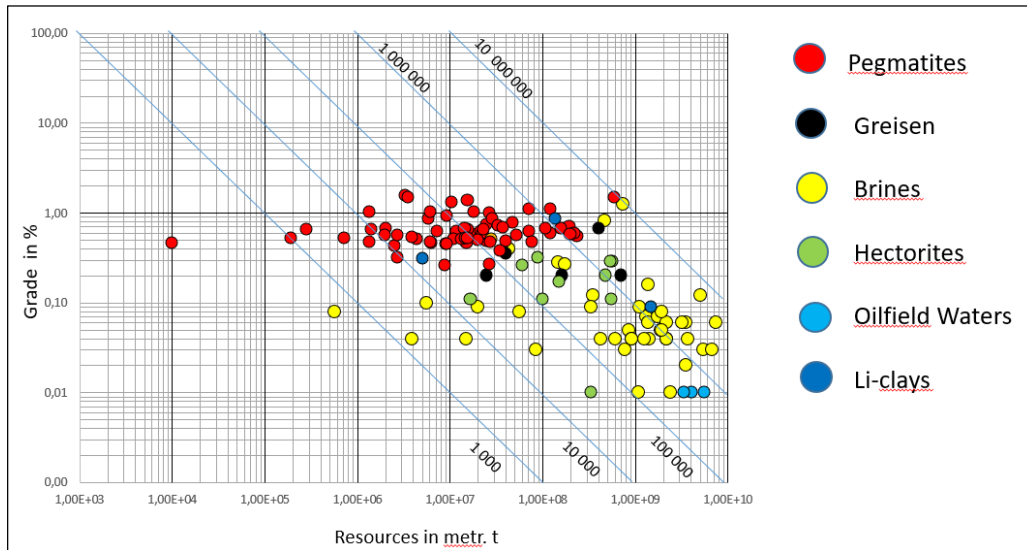


Fig. 17: globale Lithiumressourcen nach Größe und Lagerstättentyp (Eigene Erhebungen aus Unternehmensberichten)

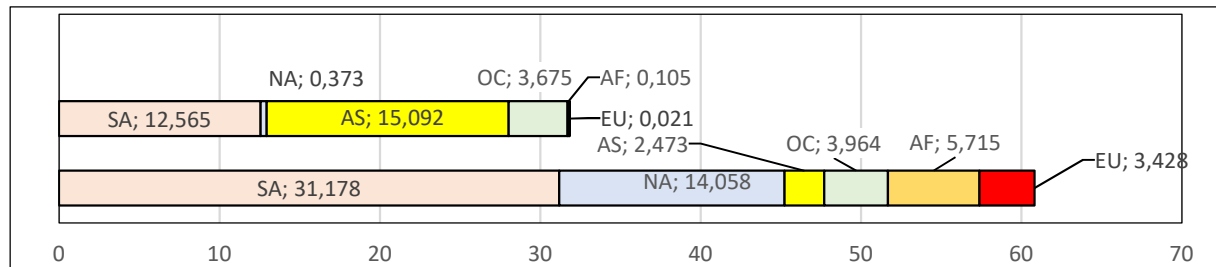


Fig. 18: Verteilung der globalen Li Ressourcen nach Kontinenten in Mio t (eigene Berechnungen)  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe (31,835 Mio t Li)  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben (60,824 Mio t Li)

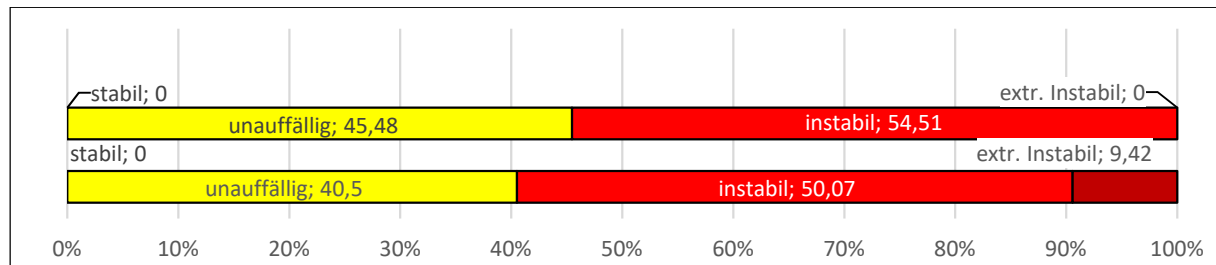


Fig. 19: Verteilung der globalen Lithium Ressourcen nach politischer Stabilität der Produzenteländer in %  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben  
 (Quelle: Ressourcen: eigene Berechnungen; pol. Stabilitätsindizes: WGI)

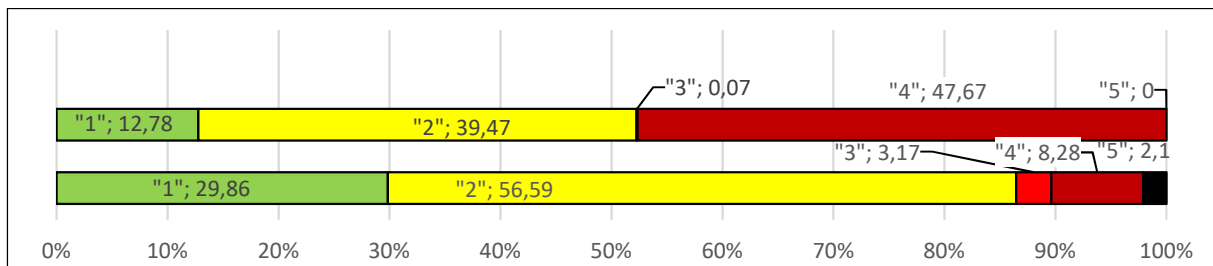


Fig. 20: Verteilung der globalen Li Ressourcen nach Umweltperformance der Produzenteländer in %  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben  
 (Quellen: Ressourcen: eigene Berechnungen; Environmental Performance Index: Wendling, Z. A., et al. 2020)

### Grafit

Von der Europäischen Kommission wurde Grafit als „kritischer Rohstoff“ eingestuft. Für die Herstellung einer Lithium-Ionen-Batterie wird nahezu 10 mal mehr Grafit als Lithium benötigt. Warum man nicht von einer „Grafit-Lithiumionen-Batterie“ spricht, lässt sich nicht erklären. Für die Erzeugung solcher Batterien eignen sich nur besonders reine Sorten, die daher besonders gefragt sind. Die globalen Ressourcen der produzierenden Unternehmen betragen nach eigenen Erhebungen ca. 585,6 Mio t. Bei gleichbleibender Produktion ergibt sich eine Reichweite von ca. 520 Jahren.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Projekte insbesondere in Afrika verfolgt, sodass zusätzliche Ressourcen von ca. 634 Mio t Grafit nachgewiesen wurden. Dies würde die Reichweite um weitere 560 Jahre erhöhen.

Aus Fig. 21 kann abgelesen werden, dass Grafitlagerstätten im Vergleich zu anderen Rohstoffen relativ geringe Größe aufweisen. Für bestimmte Anwendungszwecke wie z.B. Batterien kommen nur hochwertige Qualitäten (lump, flake) in Frage, wogegen „amorphe“ Qualitäten eher ausscheiden.

Der Bedarf an Grafit für die modernen Energietechnologien ist stark steigend und soll im Vergleich zum Bezugsjahr 2020 bis zum Jahre 2040 um das 25-fache (!) ansteigen (IEA 2021).

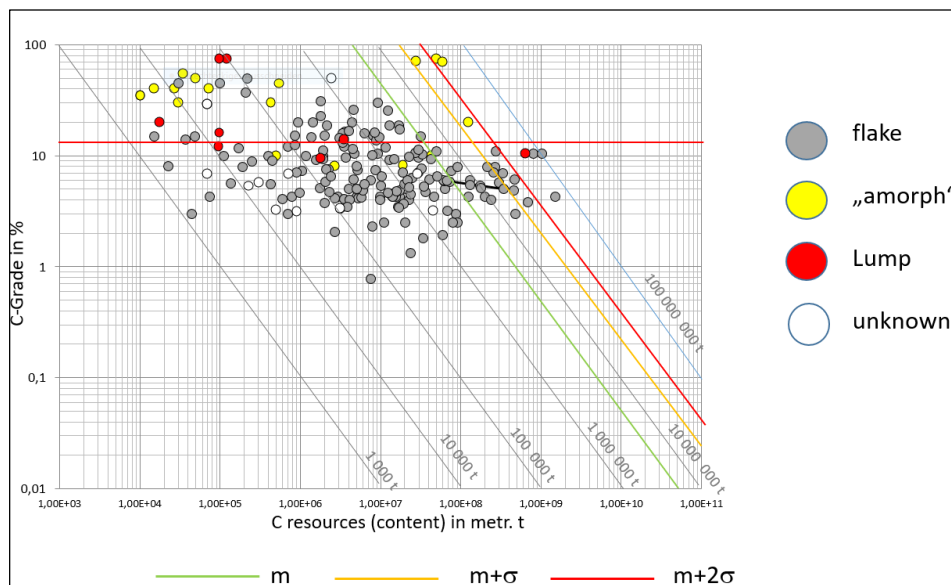


Fig. 21: globale Grafitressourcen nach Größe und Lagerstättentyp (Eigene Erhebungen aus Unternehmensberichten)

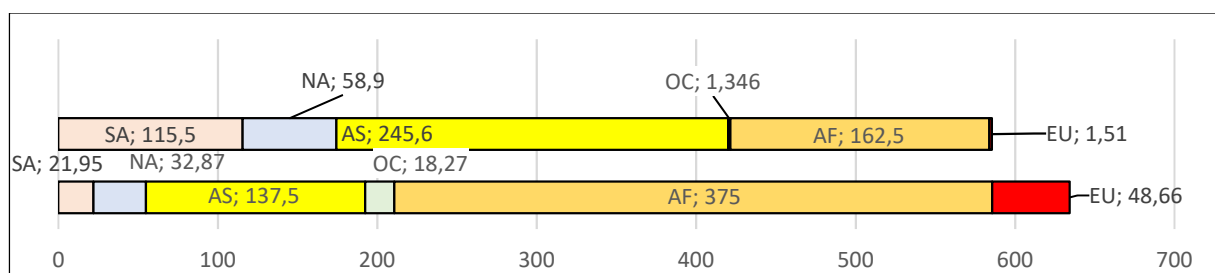


Fig. 22: Verteilung der globalen Grafit Ressourcen nach Kontinenten in Mio t (eigene Berechnungen)  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe (586 Mio t Grafit)  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben (634 Mio t Grafit)

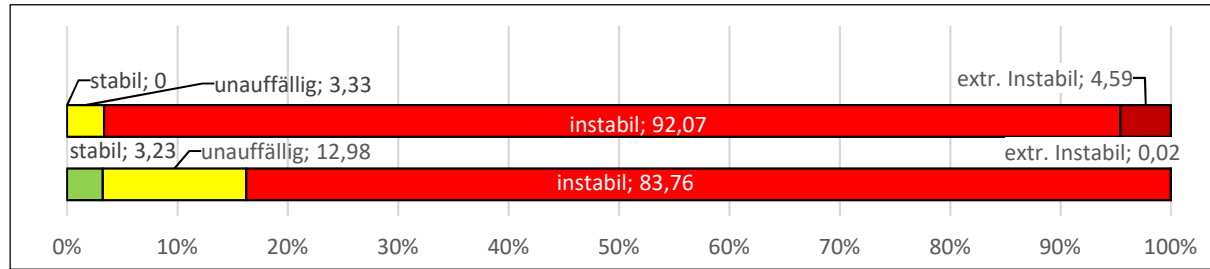


Fig. 23: Verteilung der globalen Grafit Ressourcen nach politischer Stabilität der Produzentenländer in %  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben  
 (Quelle: Ressourcen: eigene Berechnungen; pol. Stabilitätsindizes: WGI)

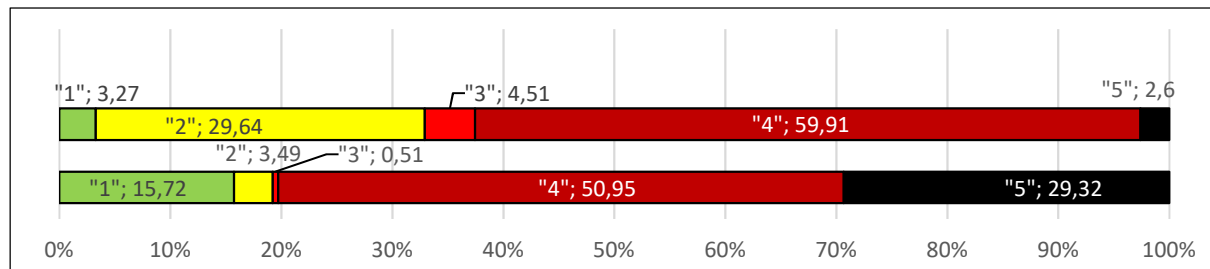


Fig. 24: Verteilung der globalen Cu Ressourcen nach Umweltperformance der Produzentenländer in %  
 oberer Balken: Ressourcen der derzeit produzierenden Betriebe;  
 unterer Balken: Ressourcen der Explorationsvorhaben

(Quelle: Ressourcen: eigene Berechnungen; Environmental Performance Index: Wendling, Z. A., et al. 2020)

**Marktkonzentrationen (Herfindahl – Hirschmann-Index [HHI]):**

Der HHI ist eine Maßzahl für die Marktkonzentration. Er errechnet sich aus der Summe der Quadrate der Einzelbeobachtungen. Bei einem Monopol (=100%) wird der Maximalwert von 10.000 erreicht. Bei lediglich 4 Einzelbeobachtungen (z.B. 10%, 20 %, 30%, 40%) ergibt sich ein Wert von 100 + 400 + 900 + 1600 = 3000. Ein HHI unter 1000 ist eine Maßzahl für eine geringe Marktkonzentration. Ein HHI zwischen 1000 und 2000 ist ein Hinweis auf einen mäßig konzentrierten Markt. Ein Wert zwischen 2000 und dem Maximalwert von 10000 ist aber ein Hinweis auf einen hochkonzentrierten Markt mit dem Risiko einer Marktbeherrschung durch wenige Anbieter. Die Marktkonzentration kann jeweils für Unternehmen, aber auch Produzentenländer berechnet werden. In dieser Arbeit werden die HHIs für die Produzentenländer angegeben, weil für die einzelnen Explorationsprojekte der eigentliche Produzent noch nicht feststeht.

Kupfer:

Unter Heranziehung der Ressourcen von produzierenden Bergbauern ergibt sich ein HHI von 1190, was als Indiz für einen mäßig konzentrierten Markt gedeutet werden darf. Betrachtet man allerdings den HHI jener Länder, wo Ressourcen durch Explorationsprojekte erschlossen worden sind, ergibt sich bereits ein HHI von 2066, was bereits auf eine mögliche künftige Marktbeherrschung durch wenige Anbieter hinweisen kann.

Lithium

Da Lithium derzeit lediglich in 11 Ländern gewonnen wird, ist eine hohe Marktkonzentration gegeben, die sich in einem HHI von 3719 ausdrückt. Explorationsprojekte werden derzeit aber in 25 Ländern betrieben, woraus eine geringere Marktkonzentration zu erwarten ist. Würden die Explorationsprojekte wirtschaftlich umgesetzt werden können, ergäbe sich ein HHI von 1839.

### Grafit:

Grafit wird in 18 Ländern abgebaut. Auf Grund der Marktdominanz Chinas liegt eine hohe Marktkonzentration vor, wie der HHI von 4103 zeigt. Betrachtet man allerdings nicht die Produktion, sondern die Ressourcen, sinkt der HHI auf 2434, woraus immer noch ein hochkonzentrierter Markt resultiert.

Die Explorationsprojekte, die sich auf 27 Länder aufteilen, würden zu einer Entspannung der Marktkonzentration führen (HHI=1782).

Mittel- bis langfristig ist eine physische Verknappung der Cu-, Li- und Grafit-Ressourcen wenig wahrscheinlich. Steigende Rohstoffpreise ermutigen einerseits zur Inangriffnahme weiterer Explorationsvorhaben, andererseits erlaubt der höhere Rohstoffpreis auch die Nutzung ärmerer Lagerstätten. Diese „modifying factors“ haben eine unmittelbare, durchaus kurzfristige Auswirkung auf die Ressourcen.

Künstlich herbeigeführte Rohstoffverknappungen (z.B. bewusst herbeigeführte Verknappungen durch Rohstoffkartelle, politische Unruhen in Produktionsländern u.a.m) sind aber keineswegs auszuschließen und stellen daher ein nicht zu vernachlässigendes Risiko dar, die hoch gesetzten Umweltziele bis 2050 zu erreichen.

### **Zusammenfassung:**

Der Umstieg von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren auf Elektrofahrzeuge wird äußerst kritisch beurteilt. Die Meinung, wonach Elektromobile keine Emissionen verursachen, ist reine Illusion. Zwar können solche Fahrzeuge ohne Emissionen betrieben werden, wogegen die Herstellung der Batterien besonders energie- und somit THG-intensiv ist. Solange derartige Batterien in asiatischen Ländern mit Kohlestrom erzeugt werden, bedeutet der Umstieg auf Elektrofahrzeuge keine Einsparung an THG.

Der Umstieg von fossilen Rohstoffen zu alternativen Energieformen zur Herabsetzung der THG-Emissionen auf das Niveau von 1990 bedeutet einen Strukturwandel bei der Aufbringung von Mineralrohstoffen. Die Angaben über den durch den Bergbau hervorgerufenen THG Ausstoß ist zum Teil stark verzerrt, weil die THG Mengen, die bei der Verstromung fossiler Energierohstoffe frei werden, oft dem Bergbau zugerechnet werden. Trotz vermehrten Rohstoffbedarfs bei der Anwendung moderner Technologien wird dabei die vermehrte THG-Emission mit lediglich 0,24 % eingeschätzt, wogegen bei Rücknahme der Förderung fossiler Rohstoffe eine wesentlich stärkere Reduktion der THG Emissionen zu erwarten ist.

Bedauerlicherweise sind die Berechnungsmodalitäten des CO<sub>2</sub>-e Ausstoßes durch den Bergbau nicht ausreichend reguliert. Wünschenswert wäre auch die Einbeziehung der Explorationsarbeiten im Vorfeld der Gewinnung sowie die Abgrenzung bis zur Verhüttung. Die Freisetzung von THG durch Verstromung darf nicht dem Bergbau zugerechnet werden. Eine einheitliche Berechnungsmethode für die Rohstoffgewinnung wäre anzustreben.

Ob der Umstieg auf alternative Energiequellen tatsächlich möglich ist, hängt aber von der Verfügbarkeit an Schlüsselrohstoffen ab. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass mittel- bis langfristig keine physischen Verknappungen zu erwarten sind. Vielmehr kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass die Verlagerung

der Rohstoffgewinnung in politisch instabile Länder oder Länder mit niedrigen Umweltstandards die Erreichung der Umweltziele erschweren kann. Rohstoffpreiskrisen können zusätzliche Probleme schaffen. Vor allem die Einschränkung oder der Verzicht auf unnötige Energieverbraucher im eigenen Haushalt kann aber ebenfalls wesentlich zur THG-Einsparung beitragen.

## Literatur:

- Azadi, M., Northey, S., Ali, S. & Edraki, M. (2020): Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation.- *Nat. Geosci.* **13**, 100–104. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>
- Delevingne, L., Glazener, W., Grégoir, L. & Henderson, K. (2000): Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know Building a climate strategy won't be quick or easy—but waiting is not an option. Mc Kinsey & Comp., (ed).
- Eisendle, M. P. (2018): UVP-Gutachten für das Vorhaben "Windpark Pretul 2" Befund und Gutachten aus dem Fachbereich Elektrotechnik, 43 S.,
- IEA (2019), *Global Energy & CO2 Status Report 2019*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>
- IEA (2021), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2020): Renewable Energy Statistics 2020 (www.irena.org)
- Nuss P. & Eckelman M.J. (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. PLoS ONE 9(7): e101298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>.
- Ortego, A., Valero, A., & Restrepo, E. (2018): Vehicles and Critical Raw Materials A Sustainability Assessment Using Thermodynamic Rarity.- *Journal of Industrial Ecology*, 22, 1005 – 1015.
- Reichl, C. & Schatz, M. (2021): World Mining Data.- Bundesministerium für Landwirtschaft, Tourismus und Regionen. (Ed.)
- Ritchie, H & Roser, M. (2020): CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions. *Published online at OurWorldInData.org*. abgerufen von: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- Rüttiger, L. Sharma, V. (2016): Climate change and mining A Foreign Policy Perspective.- Abgerufen am 5.8.2021 von <https://www.adelphi.de/de/publikation/climate-change-and-mining>
- UBA (ed. 2016): Emission Factors for Fossil Fuels.- *Climate Change 28/2016 CO<sub>2</sub>*- 48 S., Dessau-Roßlau.
- UBA (ed. 2021): Abschlussbericht.- Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen.- 392 S., Dessau-Roßlau.
- Taylor, M. (1997): Greenhouse gases and the nuclear fuel cycle: What emissions? IAEA Bull., 39/2/1997.

Wendling, Z. A., Emerson, J. W., de Sherbinin, A., Esty, D. C., *et al.* (2020). *2020 Environmental Performance Index*. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu

Wetzel, M. (2015): Materialbedarf von Stromerzeugungssystemen – Szenarienpfade für Deutschland.- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Inst. Für Technische Thermodynamik; Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.- 87 S. Stuttgart.

Weitere Internetabfragen:

<https://www.nornickel.com/investors/reports-and-results/#2018>

<http://info.worldbank.org/governance/wgi/>

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4085040/>