

Rohstoffe für die zukünftige Mobilität

Prof. Dr.-Ing. Uwe Gärtner

info@gaencon.de

1. Einleitung

Seit einem guten Jahrhundert dominiert der Hubkolbenmotor mit innerer Verbrennung als Antriebsaggregat in weiten Bereichen des Verkehrs. Im Pkw-Bestand der Bundesrepublik Deutschlands mit ca. 48,5 Mio. Fahrzeugen bspw. beträgt der Anteil von Fahrzeugen mit Benzin- und Dieselmotoren aktuell noch merklich über 90%.

Im Jahr 1990 betrug der Treibhausgas-Ausstoß des Verkehrssektors 164 Mio. Tonnen CO₂. 2020 waren es laut Klimabilanz des Umweltbundesamtes 146 Mio. Tonnen CO₂. Die Novelle des Klimaschutzgesetzes sieht vor, dass die Emissionen des Sektors bis 2030 weiter auf höchstens 85 Mio. Tonnen CO₂ reduziert werden. Bis 2030 sollen dazu u.a. 7 bis 10 Mio. Elektrofahrzeuge in Deutschland zugelassen sein, so das Ziel der Bundesregierung.

Auf der Weltklimakonferenz in Glasgow 2021 haben sich darüber hinaus verschiedene Autokonzerne, Staaten und Metropolen auf ein Ende der Verbrennungsmotoren bis 2040 festgelegt. Die beiden weltweit führenden Automobilhersteller Volkswagen und Toyota haben die Verpflichtung nicht unterzeichnet - ebenso wie der weltweit viertgrößte Automobilhersteller Stellantis (unter anderem mit den Marken Citroen, Fiat, Opel und Peugeot). Auch die japanischen Automobilhersteller Honda und Nissan sowie das koreanische Unternehmen Hyundai und der deutsche Autobauer BMW wollten sich der Initiative nicht anschließen. Unter den Unterzeichner-Staaten fehlen auch die wichtigen Automärkte China, die USA und Deutschland.

Zahlreiche Studien verschiedener Hochschulen, namhafter Forschungsinstitute und Umweltorganisationen weisen größtenteils erhebliche Vorteile des Elektrofahrzeugs im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor aus. Der Schwerpunkt dieser Vergleichsuntersuchungen liegt aber primär auf den Themen Energieeffizienz und Emissionen.

Weit weniger Aufmerksamkeit richtet sich auf die Rohstoffe, die zur Verwirklichung der genannten Klimaziele notwendig sind. Die internationale Energie Agentur IEA spricht gar von einem drohenden Missverhältnis zwischen Klimazielen und der Verfügbarkeit wichtiger Mineralien. Viele dieser Rohstoffe liegen - geografisch gesehen -

wesentlich konzentrierter als Erdöl vor. Eine noch viel stärkere Konzentration, und zwar auf ein einzelnes Land, gibt es laut IEA beim Veredeln der Rohstoffe zu gebrauchsfertigen Substanzen.

2. Zur Rohstoffsituation in Deutschland

Mengen- und wertmäßig bildeten im Bezugsjahr 2020 Sande, Kiese sowie Steine mit einem Förderanteil von zusammen erneut mehr als 80 % die bedeutendsten deutschen Rohstoffe.

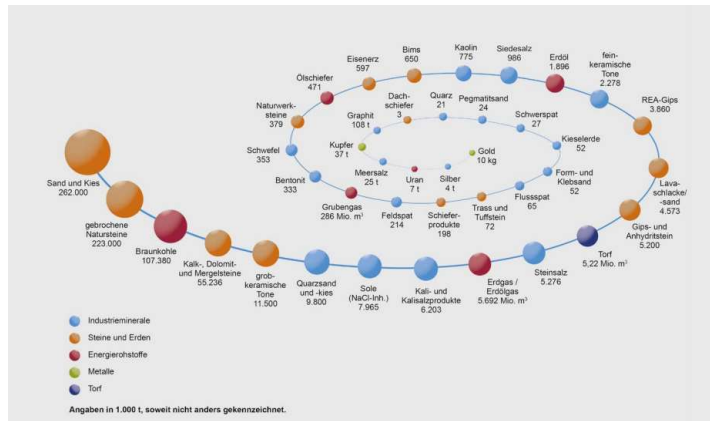


Abb. 1: Rohstoffproduktion in Deutschland im Jahr 2020, (Henning, 2021)

Bei Metallen, verschiedenen Industriemineralien und Energierohstoffen ist Deutschland hingegen weitgehend auf Importe angewiesen. Eine Ausnahme bildet die Braunkohle, die trotz starkem Produktionsrückgang mit 107 Mio. Tonnen der wichtigste heimische fossile Energieträger blieb, Abb.1 (Henning, 2021).

Energierohstoffe (inkl. petrochemischer Produkte) stellten im Jahr 2020 mit 73,3 % (=284 Mio. Tonnen) den mit Abstand größten Teil der gesamten deutschen Rohstoffeinfuhren von 384 Mio. Tonnen dar. Erdgas und Erdöl machten 41,3 % bzw. 29,9 % der Importmengen von Energierohstoffen aus.

3. Der Lebenszyklus von Fahrzeugen

Life-Cycle-Assessments (LCA) für aktuelle und zukünftige Fahrzeugkonzepte, wie exemplarisch in Abb.2 von W. Maus (Maus, 2020) postuliert, umfassen in der Regel eine kumulierte Bilanz sämtlicher CO₂-Fußabdrücke der verschiedenen Lebensphasen.

Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang aber auch die teilweise nicht nur mengenmäßig höchst unterschiedlichen Bedarfe an Rohmaterialien für die Produktion von BEV (Battery Electric Vehicle) und ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle), hier insbesondere zur Produktion der Fahrzeuge.

Weniger als die Hälfte der im Jahr 2021 in Deutschland erzeugten elektrischen Energie stammt aus sogenannten erneuerbaren Energien. In der Nutzungsphase nach Abb. 2 benötigen daher auch batteriebetriebene Fahrzeuge aktuell noch nennenswerte Mengen an fossilen Brennstoffen zur Bereitstellung ihres Fahrstroms.



Abb. 2: Der vollständige, validierbare Life-Cycle-Assessment-Ansatz (Maus, 2020)

Viele der für die Elektromobilität wichtigen Rohstoffe werden in einigen wenigen Ländern abgebaut, oft unter widrigen Arbeitsbedingungen. Die Hersteller haben deswegen ein berechtigtes Interesse, weniger Rohstoffe zu verbrauchen und das Material aus bereits vorhandenen Batterien wiederzugewinnen, (Volkswagen, 2022).

4. Rohstoffe in der Fahrzeugproduktion am Beispiel Kobalt

Der Bedarf an mineralischen Rohstoffen zur Herstellung batterieelektrischer Fahrzeuge und CO₂-neutraler Energieerzeugung ist im Vergleich zu konventionellen Techniken enorm, wie exemplarisch aus Abb. 3 hervorgeht, (IEA, 2022, Seite 6). Für ein typisches Elektrofahrzeug werden - spezifisch in kg je Fahrzeug betrachtet - etwa 6x mehr Rohstoffe erforderlich. Ein Offshore Windrad benötigt pro Megawatt gar die 9-fache Menge an mineralischen Rohstoffen wie ein Gaskraftwerk, (IEA, 2022, Seite 5).

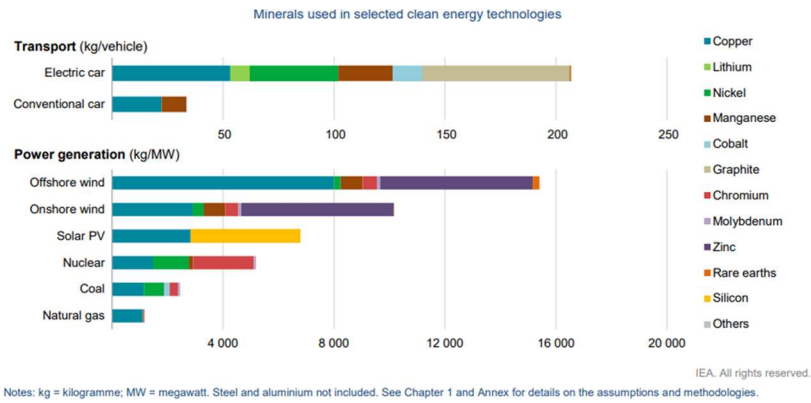


Abb. 3: Bedarf an mineralischen Rohstoffen für Mobilität und Energieerzeugung (IEA, 2022)

Fast zwei Drittel der globalen Fördermenge 2017 von ca. 120.000 Tonnen stammten aus der Demokratischen Republik Kongo DRC. Die Förder- und Arbeitsbedingungen, auch die Kinderarbeit in diesem Land sind von kompetenten Autoren ausführlich publiziert und nicht Gegenstand des vorliegenden Aufsatzes.

Der relative Anteil von LIB (Lithium-Ionen-Batterie) für Elektrofahrzeuge (=“dunkelgrüner“ Balkenanteil) ist in Abb. 4, links mit etwa 8% separat ausgewiesen und betrug damit absolut im Bezugsjahr 2017 etwa 10.000 Tonnen von den bereits genannten 120.000 Tonnen. Insofern wäre es inkorrekt, dem Elektroauto eine „Alleinschuld“ an den teilweise unmenschlichen Arbeitsbedingungen der Kobalt-Gewinnung zuzuweisen.

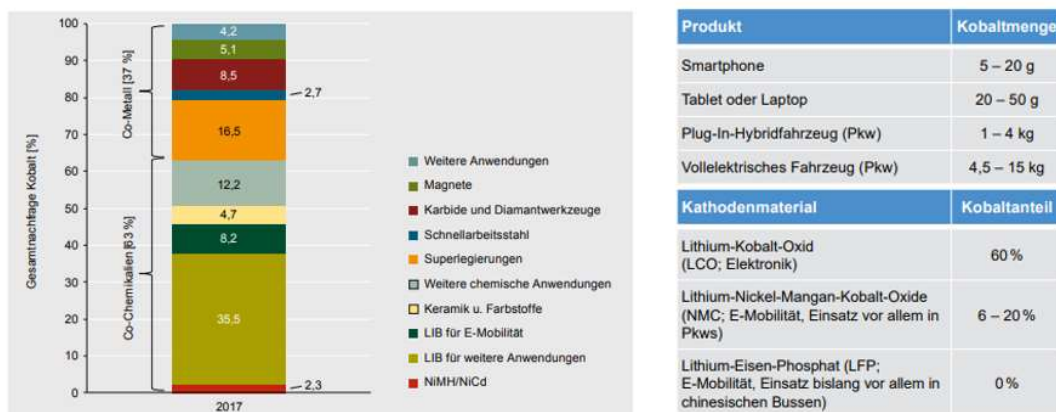


Abb. 4: Vielfältige Anwendungsbereiche für Kobalt, links: (Al Barazi, 2018), rechts: (Schütte, 2021)

Die Hauptanwendung hingegen lag 2017 mit mehr als einem Drittel – absolut ca. 43.000 Tonnen der Fördermenge – auf der Herstellung wiederaufladbarer Lithium-Ionen-Batterien LIB für den Bereich 3C (Computing, Communication, Consumer). In diese Kategorie fallen Produkte wie bspw. Laptops, Tablets, Smartphones sowie Smartwatches.

Im Jahr 1991 führte Sony den ersten serienmäßigen Lithium-Ionen-Akkumulator zur Versorgung einer Videokamera ein. Der britische Chemiker Michael Whittingham, der US-amerikanische Physiker John B. Goodenough und der japanische Ingenieur Akira Yoshino erhielten 2019 für die Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterie den Nobelpreis für Chemie. Das Kathoden-Material bestand damals zu 100% aus Kobalt-Oxid.

Die Entwicklung und die Zusammensetzung aktueller Kathoden der LIB batterieelektrischer Fahrzeuge illustriert Abbildung 5. Der Kobalt-Gehalt aktueller Zell-Technologien, wie bspw. der Nickel-Mangan-Cobalt-Technologie NMC811 liegt im Vergleich zur Ur-LIB von Sony heute im einstelligen Prozent-Bereich.

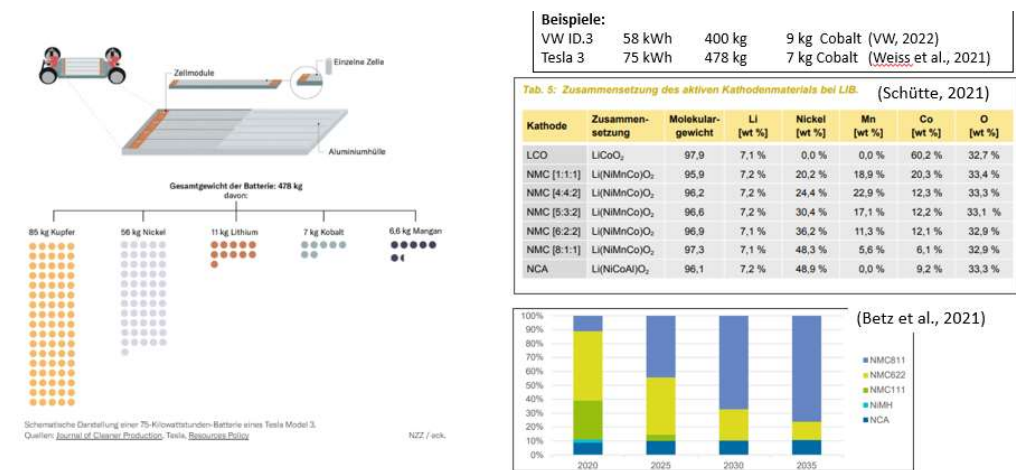


Abb. 5: Kobalt-Gehalte in Traktionsbatterien von BEV nach verschiedenen Quellen

Prognosen für die kommenden Jahre, wie bspw. seitens der Deutschen Rohstoff Agentur DERA, aber auch des Ökoinstituts e.V., der Internationalen Energie-Agentur IEA, des Instituts der Deutschen Wirtschaft und der Europäischen Kommission zeichnen trotzdem einen erheblich steigenden Bedarf auf, wie exemplarisch aus verschiedenen Quellen aus Abbildung 6 hervorgeht.

So berichtet bspw. Al Barazi von der DERA, dass bereits im Jahr 2019 der Anteil von LIB bei etwa 60% bei einer globalen Fördermenge von ca. 146.000 t lag. Für das Jahr 2029 werden ein Bedarf von 286.000 t Kobalt erwartet bei einem Batterieanteil von ca.70 bis 75 %, (HIU, 2021), s.a. Abb. 6, links unten.

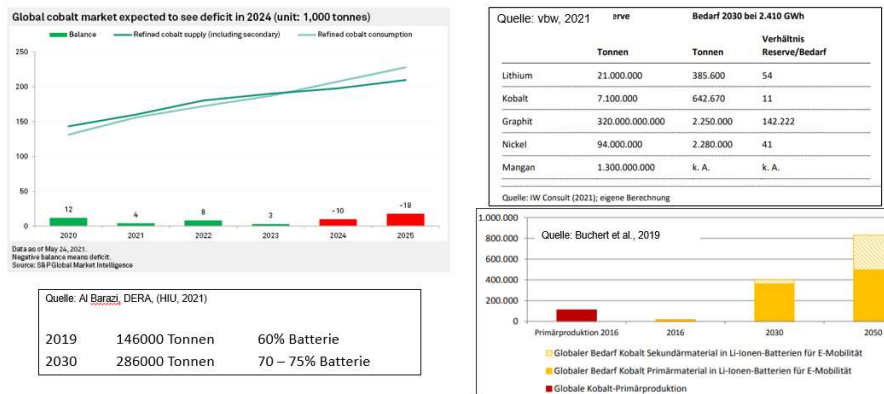


Abb. 6: Zukünftiger Bedarf an Kobalt für Lithium-Ionen-Batterien nach verschiedenen Quellen

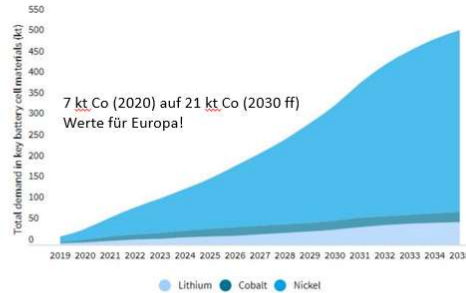
Das Öko-Institut Darmstadt (Buchert et al., 2019) schätzt den globalen Kobalt-Bedarf für das Jahr 2030 gar auf ca. 400.000 Tonnen. „Bei der Interpretation dieser Zahlen ist zu berücksichtigen, dass für die Zusammensetzung der dominierenden NMC-Lithium-Ionen-Zellen die bereits heute einsetzende Entwicklung der Minderung des Kobaltanteil bei gleichzeitiger Erhöhung des Nickelanteils – d.h. die Entwicklung von NMC 1:1:1 über NMC 6:2:2 zu NMC 8:1:1 und langfristig zu NMC 90:5:5 in den Szenarien berücksichtigt sind“, so die Studienautoren.

Die Europäische Kommission prognostiziert einen um Faktor 5 ansteigenden Bedarf an Kobalt für das Jahr 2030, für 2050 gar einen Anstieg um einen Faktor 15, (Europaparlament, 2022), (energiezukunft, 2021) im Vergleich zur aktuellen Bedarfssituation. „Kobalt kann ohne deutliche Leistungseinbuße derzeit kaum substituiert werden. Im Batteriebereich wird aber verstärkt an Reduzierung und Substitution von Kobalt gearbeitet“, resümiert eine im Dezember 2021 erschienene Studie von IW Consulting im Auftrag der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft, (vbw, 2021, Seite 90).

„Although the trend to reduce the cobalt content per battery cell persists, the overall market growth will go hand-in-hand with an increasing demand.“ bestätigt auch eine kürzlich erschienen Studie des Ökoinstituts Darmstadt in Kooperation mit dem IFEU, Heidelberg und der NGO Transport & Environmental T&E, (Betz et al., 2021).

Kobalt-Gehalt kg/kWh	Anwendung	Quelle
0,33	NMC111	(DERA, 2021)
0,27	ID.3, neu	(Volkswagen, 2019)
0,24		(ADAC, 2022)
0,15	MEB	(DRIVE-VW, 2022)
0,13	ab 2020	(T&E, 2021)
0,09	Tesla Modell 3	(Weiss, 2021)
0,082	NMC811	(DERA, 2021)
0,03	ab 2030	(T&E, 2021)

Eigene Darstellung/Berechnung nach verschiedenen Quellen



Mathieu, L. & Mathea, C. (2021) From dirty oil to clean batteries. Transport & Environment, März 2021. Abgerufen von https://www.transportenvironment.org/sites/te/0/2/Battery_raw_materials_report_final.pdf, Seite 23

Z. Vgl.: Kobalt-Gehalt in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

3 verschiedene Diesel-Pkw: 25 – 40 g Kobalt (Cullbrand et al., 2012)
100 Fahrzeuge: 33 g Kobalt je Tonne (Widmer et al., 2015)

Cullbrand, K., Magnusson, O. (2012). *The Use of Potentially Critical Materials in Passenger Car*. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Report No. 2012:13, ISSN: 1404-8167, Seite 20
Widmer, R., Du, X., Haag, O., Restrepo, E., Wäger, P. (2015). *Metallknappheit in konventionellen Pkw- und Allfahrzeug-Schredder-Output*. <https://doi.org/10.1021/iss205415d>, Seite 458f

Abb. 7: Reduzierung des Kobalt-Gehalts in Lithium-Ionen-Batterien nach verschiedenen Quellen

Nach einschlägigen Medienberichten, siehe u.a. (sonderabfallwissen, 2021), planen immer mehr Hersteller, den Rohstoff Kobalt aus ihren Batterien völlig zu eliminieren. Neben Kostendruck und stark schwankenden Kobalt-Preisen sei der Abbau des Schwermetalls sehr energieaufwendig und die Bedingungen in der Republik Kongo, wo ein großer Teil der bekannten Lagerstätten liegt, menschenunwürdig. So haben bspw. BMW, Mercedes und Tesla bereits den lange gängigen Kobalt-Anteil von 12 bis 14 Prozent in ihren Batterien deutlich reduziert, siehe auch Abbildung 7.

Tesla bietet lt. 1. Quartalsbericht 2022 mittlerweile fast die Hälfte seiner produzierten Fahrzeuge mit Kobalt-freier Batterie-Technologie an, (Tesla, 2022). Die verwendeten Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien (LFP-Batterien) werden primär im Modell 3 mit Heckantrieb und dem Modell Y mit Standardreichweite eingesetzt. Als Nachteile der LFP-Batterien werden neben einem schlechteren Kälteverhalten eine geringere Leistungsdichte in einer Größenordnung von 10 bis 20% genannt. Bei Anwendungen mit hohem Bedarf an Energiedichte bleibt Tesla weiterhin bei der Nickel-Cobalt-Mangan NMC-Technologie.

[...] Bei den kommenden Generationen von Batteriezellen wird der Kobaltanteil bereits auf weniger als zehn Prozent reduziert. Perspektivisch wollen wir durch Post-Lithium-Ionen-Technologien mit neuen Materialzusammensetzungen ganz auf Materialien wie Kobalt verzichten [...], so auch Mercedes-Vorstand Markus Schäfer in (amz, 2020).

5. Rohstoffe für den Fahrbetrieb

Neben der Batterie-Produktion in der Fahrzeug-Herstellung bleibt der Rohstoff Kobalt auch für die sogenannte Nutzungsphase des Lebenszyklus von BEV – siehe Abb. 2 – von nennenswerter Bedeutung. Seit 2003 sind in Deutschland bekanntlich nur noch schwefelfreie Otto- und Diesel-Kraftstoffe zulässig. In den Raffinerien erfolgt die Entschwefelung des Rohöls in der Regel mittels Katalysatoren auf Basis von Kobalt und Molybdän, wie Abb.8 illustriert. Aber auch Nickel-Molybdän-Katalysatoren kommen hier zum Einsatz.

Der jährliche Verbrauch an Kobalt für diese Katalysatoren ist allerdings – entgegen landläufiger Meinungen - deutlich niedriger als der Kobaltbedarf zur Herstellung von Traktionsbatterien für Elektro-Autos. Eine neuere Studie des Ökoinstituts Darmstadt in Zusammenarbeit mit dem IFEU, Heidelberg und der NGO T&E berichtet von einem Kobalt-Bedarf der deutschen Raffinerien von ca. 41 Tonnen pro Jahr, (Betz et al, 2021). Eine ältere Untersuchung der TU Berlin im Auftrag des UBA zeigt einen Jahresverbrauch von ca. 80 Tonnen (+/- 25%) für alle Anwendungen in Raffinerien auf, wobei parallel eine Recycling-Quote von 50 Tonnen (+/- 25%) erwähnt wird, (Hassan, 2003). Der reine Bedarf für die Entschwefelung wird in dieser Untersuchung mit 50 Tonnen angegeben.

Entschwefelung von Kraftstoffen

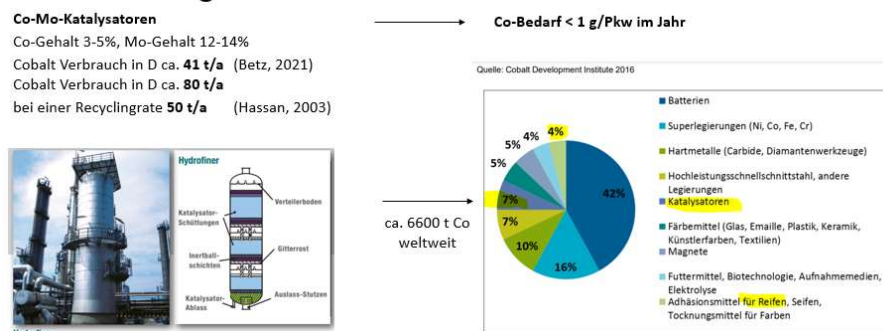


Abb. 8: Entschwefelung von Kraftstoffen mit Cobalt-Molybdän-Katalysatoren

Hinsichtlich des totalen Energiebedarfs zur Herstellung von Diesel und Benzin existieren eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen und einschlägiger Publikationen. Abb. 9, links oben, zeigt hierzu eine Auswahl verschiedener Quellen exemplarisch für Diesel-Kraftstoff. Für Benzin sind ähnliche Werte bekannt.

Energiebedarf (chem.) Well-to-Tank WtT für Diesel-Kraftstoff		
Quelle	[kWh/Liter]	[g CO2/Liter]
JRC, Concawe: Eucar WTW Report v4, 2014	2,0	526
JRC, Concawe: Eucar WTW Report v5, 2020	2,5	671
A. Hoekstra, TU Eindhoven (2020)	2,2	598
DIN EN 16258 für B7, (2013)	2,4	660
DIN EN 16258, (2013)	2,1	570
UBA (2021)	2,6	700
GEMIS 4.95	1,9	526
Bundeswehruniversität, München, (2022)	1,9	510
ifo-Studie (Buchal, Sinn et al.), (2019)	2,1	561
A. Burkert, (2021)	7	1880

Erdgas-Bedarf EU-Raffinerie (nach UBA-ProBas):

0,11 kWh Erdgas je Liter Diesel
0,15 kWh Erdgas je Liter Benzin

Erdgas-Bedarf zur Herstellung von AdBlue (nach UBA-ProBas)

0,1 kWh Erdgas je Liter AdBlue

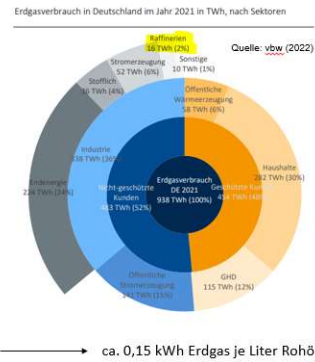


Abb. 9: Energiebedarf Well-to-Tank am Beispiel von Diesel-Kraftstoff; Bedarf der deutschen Raffinerien an Erdgas sowie Erdgas-Bedarf zur Herstellung von AdBlue

Für die Förderung, Raffinierung und den Vertrieb eines Liters Diesel bspw. mit einem Energiehalt von ca. 9,9 kWh (unterer Heizwert) ist danach ein Energieaufwand von etwa 20% des unteren Heizwertes bzw. ca. 2 kWh anzusetzen. Es muss immer wieder betont werden, dass es sich dabei nicht um elektrische Energie handelt. Der Bezug erfolgt auf die chemische Energie.

Aufgrund der aktuellen Krise in der Erdgas-Versorgung werden erwartungsgemäß auch Stimmen laut, die die Stilllegung von Raffinerien fordern, um Erdgas zu sparen. Wie aus Abb.9, rechter Bildteil hervorgeht, sind die Raffinerien am deutschen Erdgasverbrauch mit etwa 2% (!) oder 16 TWh beteiligt. Bezogen auf die raffinierten Rohölmengen des Jahres 2021 ergibt sich daraus ein Erdgas-Einsatz von etwa 0,15 kWh je Liter Rohöl. Zur Verifizierung dieses Wertes wurden zudem Daten des Umweltbundesamtes aus ProBas (**Pro**zessorientierte **Bas**isdaten für Umweltmanagementsysteme) herangezogen, (ProBas, 2022a), (Probas, 2022b). Für Benzin findet sich in dieser Bibliothek des UBA ein Energiebedarf der Raffinerie von 0,15 kWh Erdgas und für Diesel-Kraftstoff von 0,11 kWh, jeweils für einen Liter des Produkts.

Vielfach steht auch der hohe (?) Erdgas-Bedarf zur Herstellung des Stickoxid-Reduktionsmittels AdBlue für Dieselmotoren in der Kritik. Über die CO2-Emissionen von AdBlue in einer Well-to-Wheel Betrachtung liegen ausreichend validierte Daten vor, siehe bspw. (Dittler et al., 2014). Speziell für den Rohstoff Erdgas gibt die Datenbank ProBas des Umweltbundesamts einen Bedarf von 0,1 kWh Erdgas je Liter AdBlue aus.

In einem zusammenfassenden Vergleich zwischen einem Diesel-Pkw der „Golf-Klasse“ und seinem BEV-Pendant ergeben sich die jeweiligen Bedarfe verschiedener Rohstoffe für eine Fahrstrecke von 100 km aus Abbildung 10.

VW Volkswagen Golf 8 Diesel



VW Volkswagen ID.3



ICEV	4,8	l/100km
Rohstoff		Rohstoff
		kg
Rohöl	6,0	
Erdgas (Raffinerie)	0,04	
Erdgas (AdBlue)	0,02	
Summe fossil	6,06	

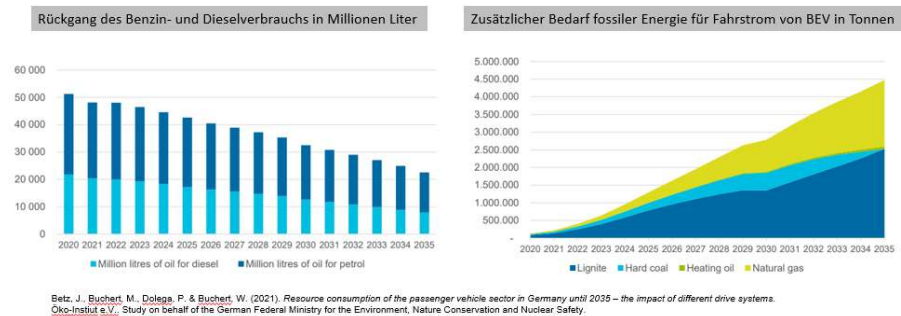
<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-id-3/>
<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/testberichte/detail/4375/vw-golf-20-tdi-scr-style-dsg/>

BEV	19,3	kWh/100km	
Rohstoff	rel.	abs.	Rohstoff
	[]	kWh	kg
Steinkohle	0,095	1,8	0,6
Braunkohle	0,202	3,9	4,2
Erdgas	0,105	2,0	0,4
Uran	0,133	2,6	0,0002
Summe fossil	0,535	10,3	5,2



Abb. 10: Vergleich der Rohstoff-Bedarfe von ICEV und BEV am Beispiel der „Golf-Klasse“

Man erkennt deutlich, dass beim Diesel-Pkw die absoluten Erdgasmengen für AdBlue und für die Raffinerie deutlich unter 1% des Rohöl-Bedarfs bewegen, Abbildung 10 linker Bildteil. Basis zur Berechnung des Fahrstroms für das BEV war die Zusammensetzung des deutschen Strommix des Jahres 2021, wie er gleichfalls aus Abbildung 10, rechts oben hervorgeht. Der Strombedarf des BEV ID.3 von 19,3 kWh/100km wurde im vergangenen Jahr zu einem großen Teil durch die Stromerzeugung der kalorischen Kraftwerke abgedeckt, d.h. aus der Verbrennung von Steinkohle, Braunkohle, Erdgas sowie zu 13,3% auch aus Kernkraft. Braunkohle stellt bei der Verstromung den größten Anteil der fossilen Brennstoffe dar. Der Erdgas-Bedarf für die Kraftstoff-Herstellung und das Stickoxid-Reduktionsmittel AdBlue beträgt etwa 15 Gew.-% der Erdgas-Menge für den Fahrbedarf des ID.3.



Betz, J., Buchert, M., Dolega, P. & Buchert, W. (2021). Resource consumption of the passenger vehicle sector in Germany until 2035 – the impact of different drive systems. Öko-Institut e.V., Study on behalf of the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.

Abb. 11: Sinkender Rohöl-Bedarf bei konventionellen Pkw sowie zunehmender Bedarf an Braunkohle, Steinkohle und Erdgas zur Erzeugung des Fahrstroms für Elektro-Pkw, (Betz et al., 2021, Seite 23, Fig.8 und Seite 37, Fig.27)

Die Auswirkungen eines Szenarios im Zeitfenster 2020 bis 2035, wonach ab 2035 nur noch batterieelektrische Fahrzeuge eine Straßenzulassung erhalten, illustriert die Abbildung 11, (Betz et al., 2021, Seite 17). Interessant ist hier der zusätzliche Bedarf an fossilen Brennstoffen bis zum Jahr 2035 in Höhe von ca. 4,5 Mio. Tonnen zur Generierung des Fahrstroms. Dem gegenüber steht die beachtliche Einsparung von etwa 28 Mio. Tonnen Rohöl im Vergleich zum Referenzjahr 2020.

6. Recycling

Deutschland ist bei Metallerzen und -konzentraten (Primärrohstoffe) zu 100% auf Importe angewiesen. Diese Abhängigkeit reduziert sich deutlich durch heimisches Recycling und Zukauf von Schrott vornehmlich in EU-Mitgliedsstaaten.

Betrachtet man allein die energetischen Aspekte, ist die Datenlage bei Recycling-Prozessen unklar bis gegensätzlich, wie Abbildung 12, linker Bildteil, nach verschiedenen Quellen verdeutlicht. Viele Vergleichsstudien zwischen BEV und ICEV erwähnen zwar das Thema, weisen aber auf einen Mangel verlässlicher Daten hin und verzichten auf die Aufnahme dieser Energiebedarfe in die Gesamtbilanz. Die LCA (Life Cycle Assessment) von OEM wie Volkswagen oder Volvo weisen CO₂e-Emissionen aus, die im einstelligen Prozentbereich zu den Emissionen der Fahrzeug- und Batterieherstellung liegen. Ökobilanzen aus dem letzten Jahr weisen sogar Gutschriften (= negative CO₂e-Emissionen) für Recycling aus. Hier ist insbesondere eine Vergleichsstudie der Bundeswehr-Universität München vom April 2022 erwähnenswert, Abbildung 12, rechter Bildteil. Die dort publizierten Zahlen basieren allerdings auf einer einzigen chinesischen Literaturstelle, (Buberger et al., 2022).

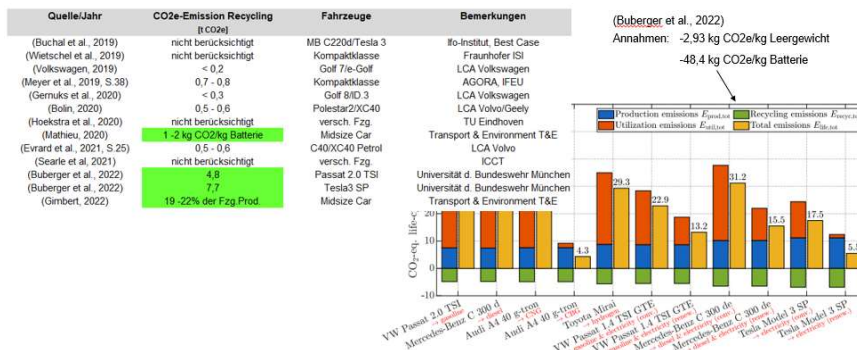


Abb. 12: Zusätzliche CO₂e-Emissionen durch Recycling-Prozesse. Grün = Gutschriften CO₂e. Linker Bildteil: Eigene Darstellung nach versch. Quellen, rechter Bildteil: (Buberger et al., 2022)

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR (BGR, 2021) berichtet, dass in der deutschen Raffinade- und Rohstahlproduktion im Jahr 2021 etwa 51 Prozent des Aluminiums, 45 Prozent des Rohstahls sowie rund 44 Prozent des Kupfers aus sekundären Rohstoffen stammen, Abbildung 13.

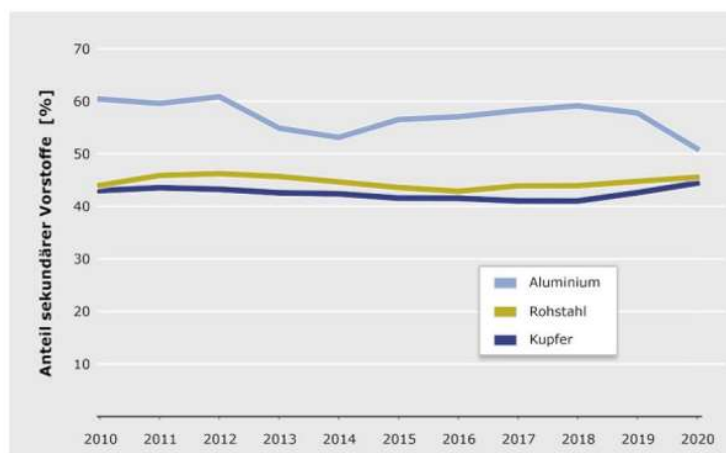


Abb. 13: Anteil sekundärer Vorstoffe an der deutschen Aluminium-, Kupfer und Rohstahlproduktion (vorläufige Zahlen für 2020), (Henning, 2021)

Bei anderen Rohstoffen sind die Recyclingquoten allerdings deutlich geringer. So werden Seltene Erden insgesamt zu weniger als 10 Prozent und Metalle wie Tantal oder Niob praktisch gar nicht recycelt (vbw,2021).

Nach Berechnungen des Instituts der deutschen Wirtschaft könnte aber bei einer Sammelquote von 65 beziehungsweise 90 Prozent des Kobalts aus Altbatterien das Recyceln dieses Rohstoffs im Jahr 2040 bereits 13 respektive 24 Prozent des europäischen Bedarfs abdecken, (iwd, 2021), siehe auch Abbildung 14, links.

Die Sammelraten bei Lithium-Ionen-Batterien sind aktuell noch niedrig. Innerhalb der EU wird die Wiedergewinnung von Lithium derzeit nicht als kosteneffizient erachtet. Als deutlich wirtschaftlicher wird die Recyclingeffizienz von Kobalt und Nickel mit 95% im Falle von Kobalt und Nickel bzw. mit 80% für Kupfer beurteilt. Graphit wird überhaupt nicht zurückgewonnen. Die Verwendung von recycelten Rohstoffen bei der Batterieherstellung ist innerhalb der EU aktuell noch niedrig: etwa 12% bei Aluminium, 22% bei Kobalt, 8% bei Mangan und 16% bei Nickel, (Halleux, 2022).

Vorschriften zum Recycling von Altbatterien existieren zwar auf europäischer und nationaler Ebene. Die noch geltende, relative lasche EU-Verordnung aus dem Jahr 2006 sieht aber lediglich eine

Wiederverwertung von 50 Gew.-% des eingesetzten Materials vor. Diese kann in der Praxis allein schon durch das Entfernen des Batteriegehäuses aus Stahl/Aluminium sowie diverser Kunststoff-Komponenten erreicht werden, während die wertvollen und gewichtsseitig leichteren Ressourcen dabei nicht zurückgewonnen werden.

Die Umweltministerinnen und -minister der EU haben im März 2022 in Brüssel einstimmig die Ratsposition zu einer neuen EU-Batterieverordnung verabschiedet, (BMU, 2022). Die Verordnung soll EU-weit für einen nachhaltigen Umgang mit Batterien entlang der gesamten Wertschöpfungskette sorgen.

Ab 2030 bzw. ab 2035 (Zahlen in Klammern) sollen u.a. bestimmte Mindestquoten an recyceltem Material bei der Batterieproduktion verpflichtend werden: 12% (20%) für Kobalt, 4% (10%) für Lithium, 4% (12%) für Nickel und 85% (85%) für Blei.

Der EU- Vorschlag sieht weiterhin bis Ende 2025 auch bestimmte Quoten für die Rückgewinnung kritischer Materialien vor. Diese betragen 90% (95%) für Kobalt, Kupfer, Nickel und Blei sowie 35% (70%) für Lithium. Die Zahlen in Klammern gelten ab dem Jahr 2030, (Halleux, 2022).

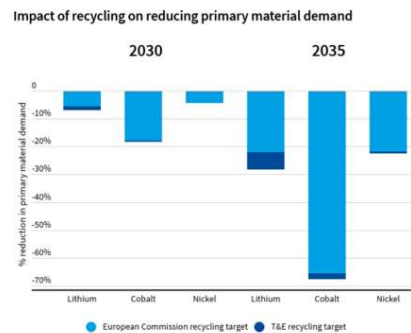
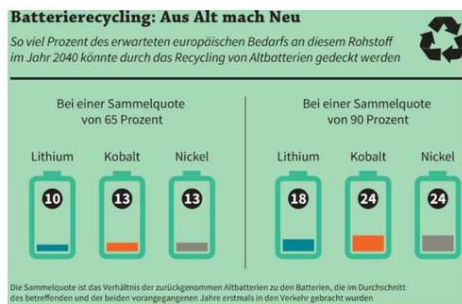


Abb. 14: Einsparung an primären Rohstoffen durch zukünftigen Einsatz von Sekundärmaterial aus Recycling-Prozessen, links: (iwd, 2021), rechts: (Mathieu et al., 2021)

Ähnlich wie bei der energetischen Bewertung, besteht augenscheinlich auch über die Rückgewinnung kritischer Rohstoff-Massen noch Untersuchungsbedarf, wie exemplarisch zwei Studien aus dem Jahr 2021 aufzeigen, Abbildung 14. Während eine Studie des Instituts der dt. Wirtschaft eine Minderung des europäischen Kobalt-Bedarfs durch Recycling von etwa 24 % für das Jahr 2040 prognostiziert, sieht die NGO Transport & Environmental bereits für das Jahr 2035 eine Einsparung von 65% durch Sekundärmaterial.

7. Zusammenfassung

Zahlreiche Studien von Hochschulen, Forschungsinstituten und Umweltorganisationen weisen erhebliche Vorteile des Elektrofahrzeugs im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor aus. Der Schwerpunkt dieser Vergleichsuntersuchungen liegt aber primär auf den Themen Energieeffizienz und Emissionen.

Weit weniger Aufmerksamkeit richtet sich auf die Rohstoffe, die zur Verwirklichung der genannten Klimaziele notwendig sind. Die internationale Energie Agentur IEA spricht gar von einem drohenden Missverhältnis zwischen Klimazielen und der Verfügbarkeit wichtiger Mineralien. Kobalt wird generell als der kritischste dieser Rohstoffe beurteilt.

Der Fahrstrom für Elektro-Fahrzeuge in Deutschland wurde im Jahr 2021 zu überwiegendem Teil durch die Stromerzeugung der kalorischen Kraftwerke abgedeckt, d.h. aus der Verbrennung von Rohstoffen wie Steinkohle, Braunkohle, Erdgas sowie zu 13,3% auch aus Kernkraft. Braunkohle stellte bei der Verstromung den größten Anteil der fossilen Brennstoffe dar.

Deutschland ist bei Primärrohstoffen für die zukünftige Mobilität zu 100% auf Importe angewiesen. Diese geografisch extrem konzentrierten Abhängigkeiten reduzieren sich merklich durch nationales Recycling kritischer Rohstoffe.

Abkürzungen:

BEV	Battery Electric Vehicle
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
LCA	Life-Cycle-Assessment
OEM	Original Equipment Manufacturer
MEB	Modularer E-Antriebs-Baukasten
T&E	Transport & Environmental, ein Zusammenschluss von Umweltverbänden mit Verkehrsschwerpunkt auf europäischer Ebene

Quellen:

Al Barazi, S. (2018): *Rohstoffrisikobewertung – Kobalt*. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DERA Rohstoffinformationen 36: 120 S.; Berlin. ISBN: 978-3-943566-49-9 (PDF)

amz(2020). *Mercedes reduziert Kobalt-Anteil*. amz-aftermarketZeitschrift vom 12. November 2020. Abgerufen von <https://www.amz.de/mercedes-reduziert-kobalt-anteil>

Bayernoil (2020). *Umwelterklärung 2020 der BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH*. Abgerufen von https://www.bayernoil.de/wp-content/uploads/2020_Umwelterklaerung.pdf

Betz, J., Buchert, M., Dolega, P. & Buchert, W. (2021). *Resource consumption of the passenger vehicle sector in Germany until 2035 – the impact of different drive systems*. Öko-Institut e.V.. Study on behalf of the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Abgerufen von <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Resource-demand-drive-systems.pdf>

BGR (2021). *BGR-Bericht zur Rohstoffsituation in Deutschland: Sand und Kies erstmals auch wertmäßig bedeutendste heimische Rohstoffe*. Pressemitteilung vom 21.12.2021. Abgerufen am 13. Juli 2022, von https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr-2021-12-21_bgr-bericht-zur-rohstoffsituation-in-deutschland.html?nn=1542388

Biról, F. (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Abgerufen am 07. August 2022, von <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

BMU (2022). *EU-Umweltrat beschließt neue Regeln für nachhaltigere Batterien*. Pressemitteilung des Ministeriums für Umwelt vom 17. März 2022. Abgerufen von <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/eu-umweltrat-beschliesst-neue-regeln-fuer-nachhaltigere-batterien>

Buberger, J., Kersten A, Kuder, M., Eckerle, R., Weyh, T. & Thiringer T, (2022). Total CO₂ -equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159 (2022) 112158, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112158>

Buchert, M. (2018). *Recycling von Kobalt und Lithium für die Energiewende*. Öko-Institut e.V., HIF Resource Talk, Freiberg, 13. Februar 2018. Abgerufen von <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=55709>

Buchert, M., Dolega, P. & Degreif, S. (2019). *Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050*. Öko-Institut e.V.: Abgerufen am 21.12.2021, von <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fab4Lib-Rohstoffe-Elektromobilitaet.pdf>

DERA (2021). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021*. Auftragsstudie der DERA, durchgeführt von Fraunhofer und Fraunhofer. Abgerufen von https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Dittler, A., Zimmermann, F. & Gärtner, U. (2014). Welchen Beitrag leistet die Abgasnachbehandlung zur CO₂ Reduktion? 12. FAD Konferenz. Dresden, 2014

DRIVE-VW (2022). *Wie viel Kobalt ist in der Batterie?* Abgerufen am 27. September 2022, von <https://drive-volkswagen-group.com/aktuelles/question/wie-viel-kobalt-ist-in-der-batterie/>

Energiezukunft (2021). *Kritische Metalle und seltene Erden für die Energiewende*. Abgerufen am 09. August 2022, von <https://www.energiezukunft.eu/wirtschaft/kritische-metalle-und-seltene-erden-fuer-die-energiewende/>

Europäische Kommission, Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU, Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U. (2020). *Studie zur EU-Liste kritischer Rohstoffe (2020)*. Abschlussbericht, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/890031>

Europaparlament (2022). *Neue EU-Vorschriften für nachhaltigere und ethisch bedenkenlose Batterien*. Europäisches Parlament – Aktuelles vom 4. März 2022. Abgerufen von <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20220228STO24218/neue-eu-vorschriften-fur-nachhaltigere-und-ethisch-bedenkenlose-batterien>

Fritz, D., Heinfellner, H. & Lambert, S. (2021). *DIE ÖKOBILANZ VON PERSONENKRAFTWAGEN*. Umweltbundesamt Österreich, Wien 2021, Report REP-0763. Abgerufen von <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0763.pdf>

Gunvor (2016). *Der Werdegang des Rohöls bis zum Produkt für den Endverbraucher*. Abgerufen von https://gunvor-raffinerie-ingolstadt.de/download/aml3mai3a57ln20ertidu800b02/Broschuere_Raffinerie_final.pdf

Halleux, V. (2022). *New EU regulatory framework for batteries - Setting sustainability requirements*. EPRS | European Parliamentary Research Service PE 689.337 – March 2022. Abgerufen von [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS_BRI\(2021\)689337_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS_BRI(2021)689337_EN.pdf)

Hassan, A. (2003). *Stand der Verwertung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie sowie Einflussfaktoren zur Verbesserung der Kreislaufführung*. TU Berlin im Auftrag des UBA. Forschungsbericht 363 01 046 UBA-FB 000443. Abgerufen von <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2284.pdf>

Henning, S. (2021). *Deutschland – Rohstoffsituation 2020*. BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. ISBN 978-3-948532-55-0. Abgerufen von https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohosit-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4

HIU (2021, 28. Dezember). *Prof. Maximilian Fichtner - Kobalt & Lithium*. Video des Helmholtz Instituts Ulm. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=pBf6_0Zwdog

Humml, S. (2022). *Woher kommen die Rohstoffe für Elektroautos?* Abgerufen am 11. Juli 2022, von <https://www.geo.de/wissen/elektroautos-woher-kommen-die-rohstoffe--31564220.html>

Hu, T., Barich, A. & Erickson, C. (2021). *Battery recycling efforts pick up as cobalt, lithium face potential deficit*. S&P Global Market Intelligence. Abgerufen am 05. August 2022, von <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/battery-recycling-efforts-pick-up-as-cobalt-lithium-face-potential-deficit-64847803>

IEA (2022). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. International Energy Agency IEA, revised version März 2022. Abgerufen am 08. August 2022, von <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

iwd (2021). *Wie Batterierecycling den Rohstoffbedarf mindern kann*. Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft vom 29. Juni 2021. Abgerufen von <https://www.iwd.de/artikel/recycling-das-zweite-leben-der-batterien-513735/>

Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, M.; Loibl, A.; Maisel, F.; Marwede, M.; Neef, C.; Neuwirth, M.; Rostek, L.; Rückschloss,

J.; Shirinzadeh, S.; Stijepic, D.; Tercero Espinoza, L.; Tippner, M. (2021): *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021*. DERA Rohstoffinformationen 50, 366 S., Berlin, ISBN: 978-3-948532-47-5.

Mathieu, L. & Mattea, C. (2021). *From dirty oil to clean batteries*. Transport & Environment, März 2021. Abgerufen von https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2021_02_Battery_raw_materials_report_final.pdf

Maus, W. (2020). *Life-Cycle-Assessment und Mobilität*. Abgerufen am 06.08.2022. von <https://www.vdi.de/news/detail/life-cycle-assessment-und-mobilitaet>

Neef, C., Schmaltz, T. & Thielmann, A., (2021). *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Abgerufen am 05. August 2022, von https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf

ProBas (2022,a). Abgerufen von <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={CFE5AF93-7B18-4E50-A2D5-8FC9A8B259FE}>

ProBas (2022,b) Abgerufen von <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={CD742530-52AB-4F73-8291-978FA3233904}>

Schütte, P. (2021). *Kobalt- Informationen zur Nachhaltigkeit*. BGR Bundesanstalten für Geowissenschaften und Rohstoffe 2021. Abgerufen am 08. August 2022, von https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kobalt.pdf;jsessionid=6879A9D954BB87293BF8CFEEAF4FC192.2_cid331?__blob=publicationFile&v=4

Sonderabfallwissen (2021). *Elektroauto-Batterien ohne Kobalt im Aufwind*. Abgerufen von <https://www.sonderabfallwissen.de/news/elektroauto-batterien-ohne-kobalt-im-aufwind/#:~:text=Hersteller%20wie%20BMW%2C%20Mercedes%20und,hoher%20Energiedichte%20oder%20geringerer%20Entflammbarkeit.>

Tesla (2022). *Q1 UPDATE 2022*. Abgerufen von https://tesla-cdn.thron.com/static/IOSHZZ_TSLA_Q1_2022_Update_G9MOZE.pdf?xseo=&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3D%22TSLA-Q1-2022-Update.pdf%22

vbw (2021). *Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft*. Studie der Vereinigung der bayerischen Wirtschaft vbw, erstellt von IW Consult GmbH, Stand 12/2021. Abgerufen von https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Au%C3%9Fenwirtschaft/2021/Downloads/211216-Rohstoffstudie_IWC_211125_SOt-2.pdf

vbw (2022). *Folgen einer Lieferunterbrechung von russischem Gas für die deutsche Industrie*. Studie der Vereinigung der bayerischen Wirtschaft vbw, erstellt von Prognos AG. Abgerufen von https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2022/Downloads/vbw_Studie_Folgen_Lieferunterbrechung_von_russischem_Erdgas_Juni_2022.pdf

Volkswagen (2022). *Akku-Recycling: Batterien sind kein altes Eisen*. Abgerufen am 07. August 2022, von <https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/akku-recycling-das-passiert-mit-dem-stromspeicher-vom-e-auto.html>

Weiss, S. & Eckstein, C. (2021). *Batterieelektrische Autos sind die Zukunft. Aber müssen wir dafür wirklich Metalle aus dem Ozean holen?* Neue Zürcher Zeitung vom 17. Juli 2021. Abgerufen am 05. August 2022, von [nzz.ch/mobilitaet/batteriebetriebene-elektroautos-sind-die-zukunft-aber-muessen-wir-dafuer-wirklich-metalle-aus-dem-ozean-holen-ld.1631132](https://www.nzz.ch/mobilitaet/batteriebetriebene-elektroautos-sind-die-zukunft-aber-muessen-wir-dafuer-wirklich-metalle-aus-dem-ozean-holen-ld.1631132)