
Wie umweltverträglich sind Elektroautos?

DUH Infopapier

Inhalt

Einleitung.....	2
Zusammenfassung.....	4
1. Wie klimaverträglich sind Elektroautos?.....	5
2. Ist das Elektroauto – trotz Batterie – umweltverträglicher als ein Benziner oder Diesel?	6
3. Wie ressourcenintensiv ist der Batterieantrieb?	7
4. Wie viel Wasser benötigen Batterie- und Verbrennungsantrieb?.....	8
5. Ist der Wasserstoffantrieb umweltschonender als der Batterieantrieb?	9
6. Können Agrokraftstoffe und E-Fuels eine Lösung darstellen?.....	10
7. Wie können Reuse und Recycling Batterien umweltverträglicher machen?	11
Endnoten.....	12

Einleitung

Um die Erderwärmung auf möglichst 1,5°C zu begrenzen, muss die Europäische Union bis 2039 – und Deutschland bis 2031 – klimaneutral werden. Hierfür muss das deutsche Klimaschutzgesetz massiv nachgebessert werden.¹ Doch bereits von der Einhaltung des bestehenden Klimaschutzgesetzes ist der Verkehrssektor weit entfernt.² Dafür müssen die jährlichen Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Emissionen von aktuell rund 150 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente (CO₂e) bis zum Jahr 2030 auf 85 Millionen Tonnen CO₂e sinken.^{3,4} In Deutschland verursacht der Verkehr bisher rund ein Fünftel der gesamten Klimaemissionen. Hinzu kommen Lungenschäden und Atemwegsprobleme durch zu hohe Feinstaubbelastung. Unter der Annahme, dass es keinen Schwellenwert gibt, unterhalb dessen die Luftverschmutzung keine Auswirkungen auf die Gesundheit hat, sind die vorzeitigen Todesfälle in Deutschland mit 63.000 aufgrund von Feinstaub und 27.700 aufgrund von Stickstoffdioxid (NO₂) zu beziffern.⁵

Daher ist ein Übergang zu einem klimaverträglichen Verkehrssektor dringend notwendig. Hierzu ist ein umfassender Ausbau des Fuß- und Radverkehrs sowie des öffentlichen Personennahverkehrs unerlässlich. Die Zahl der Autos auf den Straßen und die von ihnen gefahrenen Kilometer müssen deutlich reduziert werden.^{6,7,8} Die verbleibenden unvermeidlichen Autos müssen kleiner, leichter, effizienter und klimaneutral werden. Dies geht nur durch eine konsequente Umstellung hin zu vollelektrischen Fahrzeugen. Hybridfahrzeuge, Wasserstoffantrieb, Agrokraftstoffe und E-Fuels sind keine umweltverträglichen Alternativen.^{9,10,11,12}

Bei einer Betrachtung aller Umweltfolgen sind Elektroautos im Vergleich zu anderen Pkw-Antriebsarten am umweltverträglichsten. Dieses Papier soll aufzeigen, wie es zu diesem Umweltvorsprung – auch mit Blick auf die benötigten Ressourcen – kommt und dass dennoch ein Ersatz der rund 46 Millionen Pkw¹³ mit Verbrennungsantrieb in Deutschland durch Elektroautos völlig verfehlt wäre. Denn auch deren Herstellung ist mit einem erheblichen Ressourcen- und Energieverbrauch verbunden und ihr Einsatz geht mit einem enormen Flächen- und Infrastrukturbedarf einher. Im direkten Vergleich zu anderen Pkw-Antriebsarten ist der Batterieantrieb jedoch die effizienteste und umweltschonendste Option. So stoßen neu zugelassene Elektroautos in Europa derzeit mit durchschnittlich 75 Gramm (g) CO₂e/km über ihren gesamten Lebenszyklus circa 69 % weniger Treibhausgase aus als vergleichbare benzinbetriebene Fahrzeuge.¹⁴ Bei Einsatz von Ökostrom in Herstellung und Betrieb sinkt der CO₂-Ausstoß nochmals erheblich. Während der Batterieantrieb mehr abiotische Ressourcen (Mineralien und Metalle) für die Herstellung benötigt, hat der Verbrennungsantrieb bei der Nutzung einen hohen Verbrauch biotischer Ressourcen, wie Benzin und Diesel, die nach einmaligem Gebrauch nicht recycelt werden können.

Um die Umweltvorteile der Elektromobilität voll auszuschöpfen, müssen erneuerbare Energien beschleunigt ausgebaut, Effizienzstandards für Pkw eingeführt und eine umweltverträgliche Gewinnung und Kreislaufführung von Ressourcen sichergestellt werden.

Weitere Informationen und politische Handlungsempfehlungen zu Batterien finden Sie hier:

<https://www.duh.de/projekte/batterien/>

Weitere Informationen und politische Handlungsempfehlungen zur Mobilitätswende finden Sie hier:

<https://www.duh.de/themen/verkehr/>

	Verbrennungsantrieb	Batterieantrieb
Antrieb	Verbrennungsmotor mit Abgasreinigungseinheit (Katalysator)	Elektromotor mit Batterie
Kraftstoff	Fossiles Benzin/Diesel, biogenes Benzin/Diesel, E-Fuels	Elektrischer Strom
Rohstoffe Pkw	Eisen, Aluminium, Kunststoff, Magnesium, Kupfer, Plastik, Glas, Gummi und andere ^{15,16}	
Rohstoffe Antrieb	<p>Verbrennungsmotor: Eisen, Aluminium, Kupfer, Gummi, Kunststoff und andere¹⁷</p> <p>Katalysator: Platin, Palladium, Rhodium und andere¹⁸</p> <p>Starterbatterie: Blei, Schwefelsäure, Polypropylen und andere¹⁷</p>	<p>Asynchronmotor: Kupfer, Aluminium, Eisen^{19,20} / Permanentmagnetmotor: Kupfer, Eisen, Aluminium, Dysprosium, Neodym und andere^{21,20,16}</p> <p>Antriebsbatterie NMC: Nickel, Mangan, Kobalt, Lithium, Kupfer, Aluminium, Graphit und andere²² / LFP: Lithium, Eisen, Phosphor und andere²³</p> <p>Starterbatterie: Lithium, Eisen, Phosphor und andere²⁴</p>
Wirkungsgrad von Energiequelle bis Räder	24 % (Diesel fossil) ²⁵ 20 % (Benzin fossil) ²⁶ 15 % (E-Fuels/Ökostrom) ^{26,27}	64 - 77 % (Ökostrom) ^{26,25,28,29} 45 % (Strommix) ²⁵
Direkte Emissionen beim Fahren	Kohlenstoffdioxid (CO ₂), Stickstoffoxide (NO _x), Schwefeloxide (SO _x), Feinstaub (PM), Mikroplastik ³⁰	Feinstaub und Mikroplastik (durch Reifen- und Bremsabrieb)
CO ₂ -Emissionen über gesamten Lebensweg	200 - 250 g/km (Benzin/Diesel fossil) ^{14,16,31,32}	75 - 150 g/km (Strommix) ^{16,25,31,33}

Tabelle 1: Gegenüberstellung Batterie- und Verbrennungsantrieb

Zusammenfassung

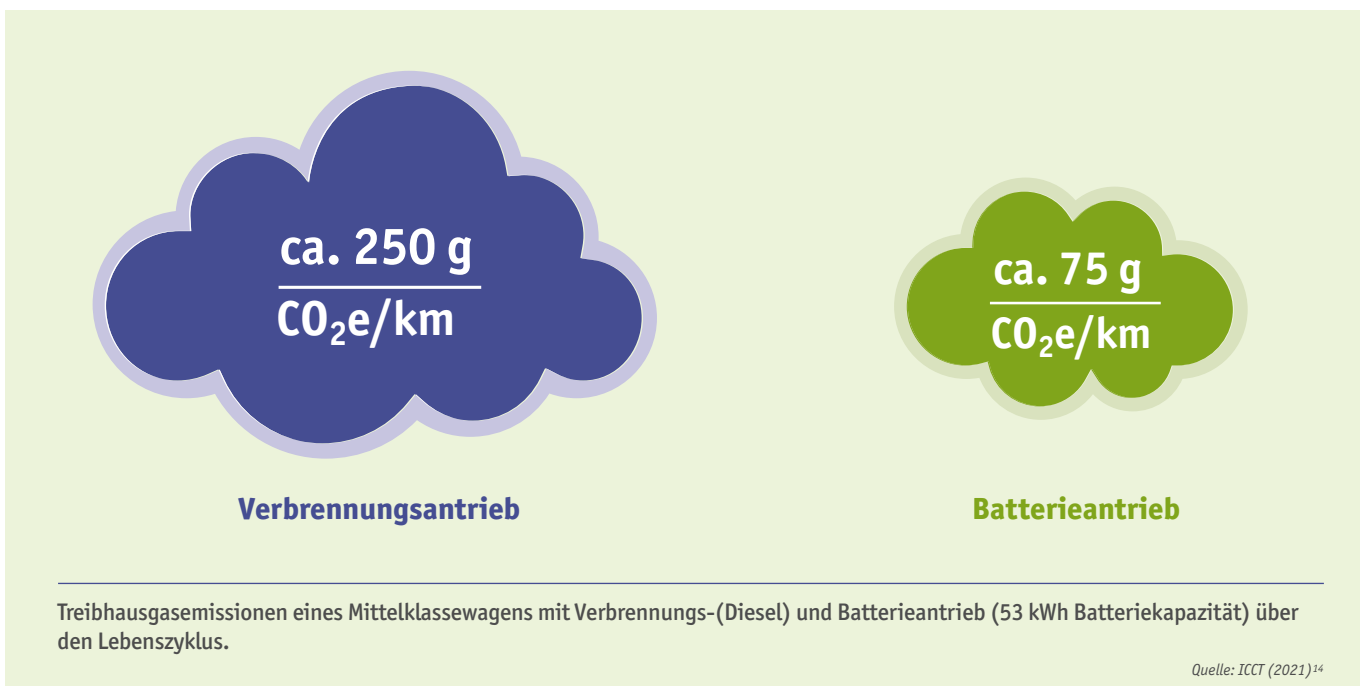
- » Nur eine umfassende Mobilitätswende mit deutlich weniger Autos und einem Umstieg auf Fuß-, Rad- und öffentlichen Verkehr ermöglicht eine klimaverträgliche und umweltgerechte Mobilität. Diese Dinge sollten von der Politik priorisiert werden und nicht der 1:1-Ersatz konventioneller Autos durch Elektroautos.
- » Pkw mit Verbrennungs- und Batterieantrieb sind beide umweltintensive Antriebsformen und sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Im direkten Vergleich ist der Batterieantrieb weniger umweltschädlich als der Verbrenner.
- » In Ökobilanzen schneidet der Batterieantrieb beim Verbrauch von Mineralien und Metallen schlechter ab und der Verbrennungsantrieb bei Energieverbrauch, Klimaerwärmung und Ozonvorläufern. Bis zum Jahr 2050 wird davon ausgegangen, dass der Batterieantrieb in nahezu allen Bereichen im Vergleich zum Verbrennungsantrieb deutlich geringere Umweltauswirkungen verursacht.
- » Mit 75 – 150 g CO₂ e/km (Strommix) weist der Batterieantrieb über den gesamten Lebenszyklus deutlich geringere CO₂-Emissionen auf, als der Verbrennungsantrieb mit 200 – 250 g CO₂ e/km. So verursacht ein durchschnittlicher mittelgroßer Diesel-Pkw der „Golf-Klasse“ etwa dreimal so viel CO₂ e/km wie ein vergleichbares Elektroauto. Wird erneuerbare Energie eingesetzt, können die CO₂-Emissionen des Batterieantriebs weitgehend vermieden werden.
- » Über den Lebenszyklus verbraucht der Verbrennungsantrieb mehr Wasser als der Batterieantrieb. Durch einen höheren Anteil von Ökostrom und schwerer zu erschließende Ölquellen wird sich dieser Unterschied zukünftig deutlich vergrößern. Problematisch ist insbesondere die Belastung von Wasser mit Schadstoffen durch die Rohölgewinnung sowie Schädigung und Verbrauch von Wasserreservoirien in trockenen Gebieten bei der Lithiumgewinnung. Letzteres kann durch Wasserrückgewinnung und Abscheideverfahren sowie Lithium-freie Batterien reduziert werden.
- » Im Vergleich zu anderen Antriebsarten ist der Batterieantrieb der effizienteste mit einem Wirkungsgrad von Energiequelle bis zu den Rädern von 45 % bei aktuellem Strommix und 64 - 77 % bei Verwendung von Ökostrom. Im Vergleich hat der Verbrennungsmotor nur einen Wirkungsgrad von 20 - 24 %.
- » Neben dem Einsatz von Ökostrom sind ein möglichst geringes Fahrzeuggewicht, neue Batterietypen ohne kritische Rohstoffe, Sorgfaltspflichten für die Lieferkette und Effizienzvorgaben für Elektrofahrzeuge weitere Hebel zur Reduktion der Umweltauswirkungen.
- » Durch Wiederverwendung und Recycling kann die Umweltbilanz des Batterieantriebs erheblich verbessert werden. Insbesondere die Reparatur sowie die Wiederverwendung von Antriebsbatterien als stationäre Energiespeicher sollten politisch stärker gefördert werden.
- » Der Wasserstoffantrieb ist für Pkw keine umweltverträgliche Option, unter anderem da er selbst bei Nutzung erneuerbarer Energien zur Wasserstoffherstellung deutlich weniger effizient als der Batterieantrieb ist.
- » Agrokraftstoffe und E-Fuels sind aus Umweltsicht keine Lösung, da sie keinen wirksamen Beitrag zum Klimaschutz leisten und ihr Einsatz sehr ineffizient ist. So erreichen E-Fuels selbst bei Nutzung von Ökostrom zu ihrer Herstellung nur einen Wirkungsgrad von 15 %. Bei Nutzung des Strommixes sind E-Fuels deutlich klimaschädlicher als fossile Kraftstoffe. Agrokraftstoffe verursachen unter Einbeziehung von Landnutzungsänderungen ebenfalls höhere Emissionen als fossile Kraftstoffe.

1. Wie klimaverträglich sind

Elektroautos?

Ökobilanzen belegen, dass der Batterieantrieb über den gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung und Entsorgung) einen deutlich geringeren CO₂-Fußabdruck aufweist als der Verbrennungsantrieb.^{16,31,34} Mit dem derzeitigen Strommix der EU – also einem Anteil von 44,6 % erneuerbaren Energien³⁵ – sind die CO₂-

Emissionen eines Elektroautos um 66 - 69 % geringer als bei einem vergleichbaren Auto mit Verbrennungsantrieb.^{14,33,36} Während ein Dieselfahrzeug unter normalen Fahrbedingungen in Europa bis zu 250 g CO₂ Äquivalente pro km (CO₂ e/km)^{14,32} unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus ausstößt, sind es beim Elektrofahrzeug mit einer Batteriekapazität von 53 Kilowattstunde (kWh) hingegen nur 75 g CO₂ e/km^{14, 32}. So verursacht ein durchschnittlicher mittelgroßer Diesel-Pkw der „Golf-Klasse“ etwa dreimal so viel CO₂-Äquivalente/km wie ein vergleichbares Elektroauto.³²



Die CO₂-Emissionen des Batterieantriebs werden derzeit vor allem durch die Batterieherstellung und die Strombereitstellung verursacht. Je nach Herstellungsverfahren und Batterietyp fallen für eine kWh Batteriekapazität zwischen 40 und 350 Kilogramm (kg) CO₂-Emissionen an.³⁷ Diese Emissionen ließen sich weitgehend vermeiden, wenn für die Herstellung erneuerbare Energien eingesetzt würden.¹⁶ Auch die beim Fahren verursachten CO₂-Emissionen gehen insbesondere auf die Nutzung von Kohle und Gas für die Stromerzeugung zurück und lassen sich durch die Nutzung von Ökostrom auf 1-2 g CO₂ e/km, d.h. nahezu Null, absenken.¹⁶ Selbst wenn die Batterie in China produziert und das Elektroauto mit reinem Kohlestrom geladen wird, stößt es über seinen Lebensweg trotzdem noch 37 % weniger CO₂ aus als das Auto mit Verbrennungsantrieb.³³

Derzeit nimmt das Gewicht von Fahrzeugen zu. Dieser Trend ist auch bei batteriebetriebenen Fahrzeugen zu beobachten. Dem muss jedoch in Zukunft entgegengewirkt werden, da der Einsatz kleinerer Fahrzeuge mit geringerem Fahrzeuggewicht und Materialeinsparungen durch kleinere Batteriekapazitäten einen erheblichen Einfluss auf die Reduzierung der Emissionen hat.^{16,34} Durch den

zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien im Strommix und ein flexibles Lademanagement sowie durch die geplante EU-Batterieverordnung³⁸, die Höchstwerte für die CO₂-Emissionen von Batterien über deren Lebenszyklus festlegt, werden die CO₂-Emissionen des Batterieantriebs weiter reduziert. Auch die rasant verlaufende Entwicklung neuer Batterietypen und -Materialien wird zukünftig zu niedrigeren CO₂-Emissionen bei der Herstellung führen. Schließlich können Batterien aus der Elektromobilität aufgrund ihrer hohen Restkapazität als stationäre Stromspeicher weiterverwendet werden, wodurch sich deren Ökobilanz nochmal deutlich verbessert und weniger neue Speicherbatterien produziert werden müssen.

2. Ist das Elektroauto – trotz Batterie – umweltverträglicher als ein Benziner oder Diesel?

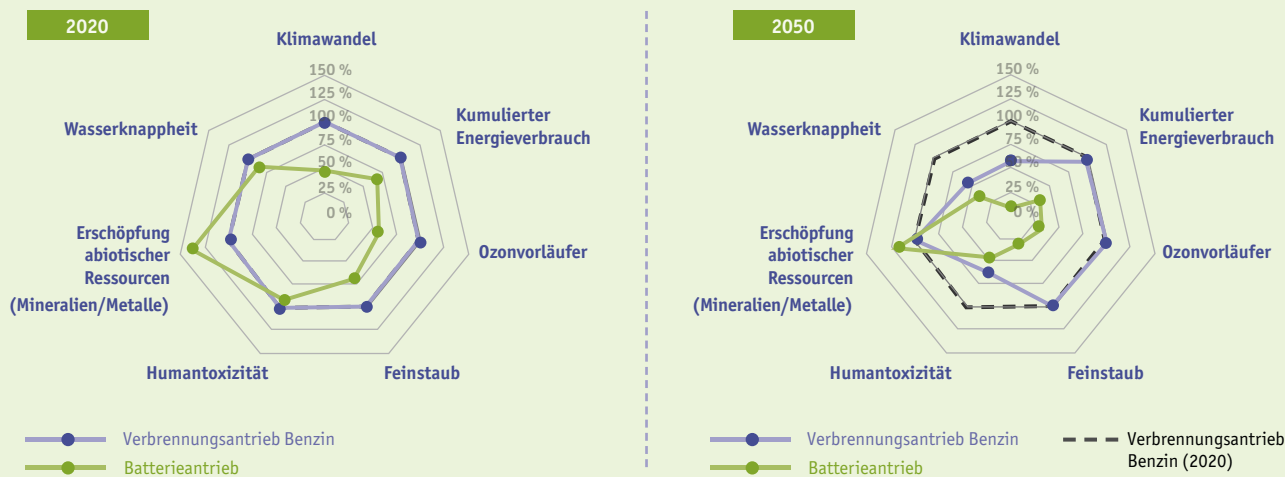
Ob Verbrennungs- oder Batterieantrieb, die Herstellung, Nutzung und Entsorgung jedes Fahrzeuges belastet die Umwelt. Während beim Verbrennungsantrieb neben der Herstellung vor allem die Nutzung den Hauptteil der Umweltbelastungen ausmacht, macht beim Batterieantrieb die Batterieproduktion einen wesentlichen Anteil der Umweltauswirkungen aus. So werden bei Letzterem aktuell etwa 40–50% der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus durch die Batterieproduktion bestimmt.³⁷ Eine Einschätzung, welcher Antriebstyp sich bei Einbeziehung aller Umweltfolgen als weniger umweltschädlich erweist, kann nur qualitativ erfolgen. Ein quantitativer Vergleich – etwa im Zuge von Ökobilanzen – stellt hierfür eine wichtige Grundlage dar, wobei das Ergebnis stark durch unterschiedliche Berechnungsmethoden, Systemgrenzen, Wirkindikatoren, Datengrundlage – und -aktualität etc. beeinflusst wird.

Aktuelle Ökobilanzen sprechen dem Batterieantrieb im Vergleich zum Verbrennungsantrieb über den gesamten Lebenszyklus hinweg beim abiotischen Ressourcenverbrauch (Mineralien und Metalle) höhere Umweltbelastungen zu. Demgegenüber weist der Verbrennungsantrieb beim kumulierten Energieverbrauch, Klimaerwärmung und Ozonvorläufern ein schlechteres Ergebnis auf.

Indikatoren wie Feinstaub, Versauerung und Toxizität werden u.a. von den Abbauregionen und -bedingungen beeinflusst, sodass die Ergebnisse variieren.^{16,27,31} Bis zum Jahr 2050 wird davon ausgegangen, dass der Batterieantrieb in nahezu allen Wirkkategorien im Vergleich zum Verbrennungsantrieb deutlich geringere Umweltauswirkungen verursacht. In diesem Zeitraum gleicht sich selbst der Verbrauch abiotischer Ressourcen für beide Antriebstypen an.²⁷ Grund hierfür sind effizientere Herstellungsverfahren und Batterien, neue Batterietypen mit geringerem Bedarf umweltintensiver Rohstoffe, ein zunehmender Anteil erneuerbarer Energien bei Herstellung und Nutzung sowie Verbesserungen beim Recycling der Batterierohstoffe. Beim Verbrennungsantrieb stellt der Einsatz sogenannter alternativer Kraftstoffe, wie E-Fuels, Wasserstoff oder Agrokraftstoff aus Umweltsicht keine sinnvolle Alternative dar (siehe Kapitel 5 und 6).

Bei einer Gesamtbetrachtung der heutigen und zukünftigen Umweltfolgen stellt sich der Batterieantrieb als weniger umweltschädlich als der Verbrennungsantrieb dar. Nötig sind eine drastische Verringerung des Individualverkehrs, ein früherer Zulassungsstopp für Autos mit Verbrennungsantrieb und ein massiver Ausbau von Fuß-, Rad- und öffentlichem Verkehr.^{39,40,41,42,43} Darüber hinaus hat der Einsatz kleinerer Fahrzeuge mit geringerem Gewicht und kleineren Batteriekapazitäten einen erheblichen Einfluss auf die Reduzierung der Emissionen.³⁴

Umweltauswirkungen von Verbrennungs- und Batterieantrieb



Vergleich der Ökobilanz von Kompakt Pkw mit Verbrennungs- und Batterieantrieb von 2020 und 2050.

Quelle: EU COM (2020)²⁷

Ursächlich für die hohen Umweltauswirkungen des Batterieantriebs beim abiotischen Ressourcenverbrauch ist in erster Linie die Herstellung des Lithium-Ionen-Akkus. Hier kommt es unter anderem zu Wasser- und Bodenverschmutzungen durch den Bergbau und die energieintensiven Raffinerie- und Herstel-

lungsprozesse, die CO₂-, Ammoniak-, Schwefel- und Stickoxid-Emissionen verursachen. Ursächlich für die hohen Umweltauswirkungen des Verbrennungsantriebs bei Energieverbrauch und Klimaerwärmung sind vor allem die Herstellung und Verbrennung von Kraftstoffen für den Fahrbetrieb sowie die hiermit zusammen-

hängenden Umweltkatastrophen bei der Rohölgewinnung und Verarbeitung (siehe Kapitel 3).³¹ Zudem benötigt der Verbrennungsantrieb für die Abgasreinigung Katalysatoren, die Platingruppenmetalle enthalten und eine umweltintensive Gewinnung und Verarbeitung erfordern.⁴⁴

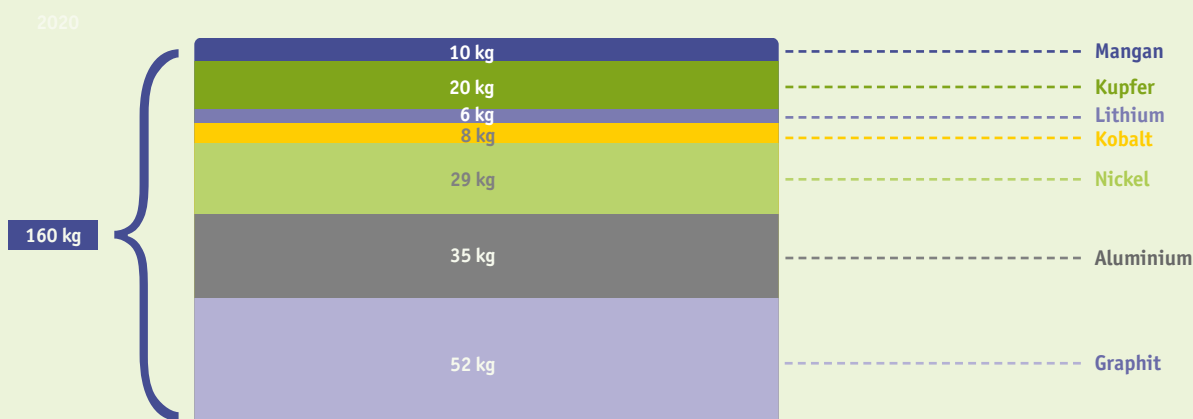
Herauszustellen ist, dass der Batterieantrieb im Vergleich zum Verbrennungsantrieb praktisch keine direkte Schadstofffreisetzungen während des Fahrbetriebs verursacht und so die Luftqualität in städtischen Gebieten verbessert, was zu weniger atemwegsbedingten Todesfällen führt.^{31,32,45} Demgegenüber bedroht der Abbau und die Verarbeitung von Rohstoffen für Batterie, Katalysator, Motor und Karosserie sowie Kraftstoffen immer wieder Menschenrechte und indigene Völker (siehe Kapitel 3 und 4).^{46,47} Um Umwelt- und Menschenrechte in der Lieferkette besser zu schützen, sollen unter anderem mit der EU-Batterieverordnung⁴⁸ und dem EU-Lieferkettengesetz⁴⁹ weitgehende Transparenz und Haftungspflichten

eingeführt werden, wobei zum Teil bestimmte Risikokategorien, Produkte, Rohstoffe und Branchen sowie kleine und mittelgroße Unternehmen noch ausgenommen sind.

3. Wie ressourcenintensiv ist der Batterieantrieb?

Wie ressourcenintensiv Batterie- und Verbrennungsantrieb sind, wird oft kontrovers diskutiert. Obwohl der Vergleich komplex ist und die für beide Antriebstechnologien benötigten Rohstoffe unterschiedlich sind, haben beide Antriebstechnologien eindeutig eine hohe Ressourcenbelastung.⁵⁰ Während der Verbrauch abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle) beim Batterieantrieb gegenwärtig deutlich erhöht ist, ist beim Verbrennungsantrieb der Verbrauch biotischer Ressourcen (Erdöl) stark erhöht.^{51,52}

Materialzusammensetzung einer Antriebsbatterie



Zusammensetzung einer Lithium-Ionen-Batterie mit 160 kg.

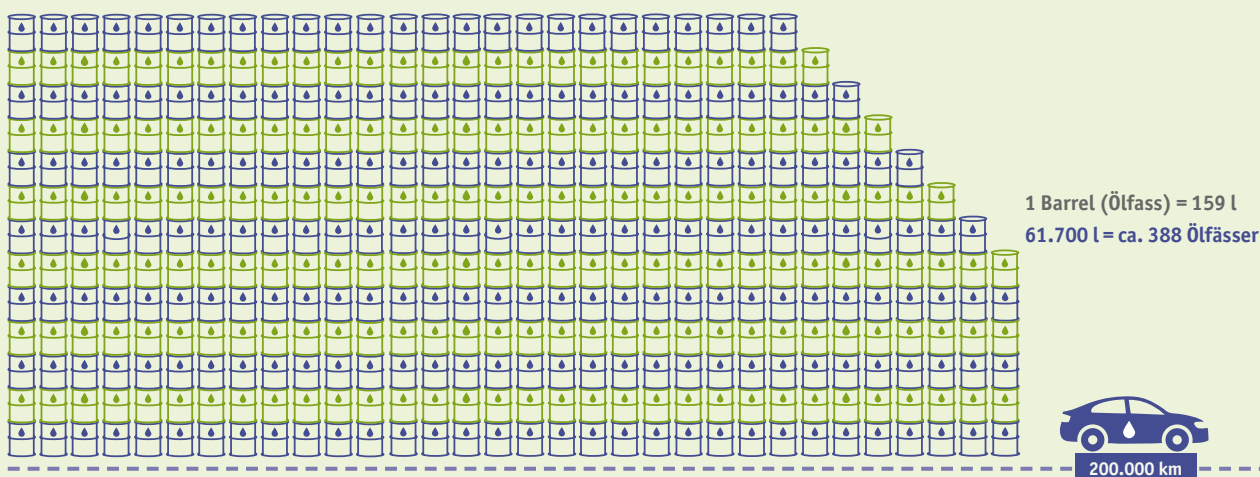
Quelle: T&E (2021)²²

So benötigt der Batterieantrieb mehr Technologiemetalle wie Lithium, Kobalt, Nickel und Kupfer für die Batterie und Seltene Erden, sofern ein Permanentmagnetmotor eingesetzt wird.⁵³ Die Nachfrage nach diesen Metallen wird u.a. durch den Ausbau der Elektromobilität in den nächsten Jahrzehnten weiter steigen.^{54,55} Die ansteigende Nachfrage wird mit einer Zunahme der Umweltauswirkungen des Bergbaus einhergehen, da die Rohstoffvorkommen schwieriger zu erschließen sind. Allerdings werden in Zukunft durch Effizienzsteigerungen weniger Rohstoffe nötig, um eine kWh Batteriekapazität zu produzieren^{55,56}. Zudem wurde der Einsatz teurer und umweltintensiver Rohstoffe wie Kobalt, Nickel und Lithium pro kWh Batteriekapazität bereits deutlich reduziert und soll sich weiter reduzieren.⁵⁵ Dazu setzen sich zunehmend kostengünstige

Batterietypen, die ohne Kobalt und Nickel auskommen, wie die Lithium-Eisenphosphat-Batterie am Markt durch.^{57,58,59} Für 2023 wird auch der kommerzielle Einsatz von Natrium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität erwartet, wodurch weniger umweltintensive Materialien zum Einsatz kommen und Lithium, Kobalt und Nickel vermieden werden.^{60,61,62} Große Hersteller von Elektroautos setzen statt dem Permanentmagnetmotor bereits heute Asynchronmotoren ein, wodurch keine Seltenen Erden für Motor oder Batterie mehr benötigt werden.^{53,63 64,65}

Der Verbrennungsantrieb benötigt alleine in der Nutzung ungefähr 61.000 Liter Rohöl⁶⁶ sowie bei der Herstellung u.a. Platin, Palladium oder Rhodium für die Katalysatoren.^{22,50}

Rohölverbrauch Pkw mit Verbrennungsantrieb in der Nutzungsphase



Über 200.000 km verbraucht ein Pkw 61.700 Liter Rohöl.

Quelle: Eigene Berechnung DUH (2022)⁶⁶

Der Materialverbrauch für weitere Komponenten wie Reifen, Karosserie und Innenausstattung ist bei beiden Antriebsformen ungefähr vergleichbar.⁶⁷ Der mit Abstand größte Anteil des Ressourcenverbrauchs beim Verbrennungsantrieb entfällt auf die Nutzungsphase. Problematisch sind hier insbesondere die mit der Ölförderung verbundenen Umweltschäden, wie Schadstofffreisetzung, Klimaemissionen und Naturraumzerstörung sowie schwere Umweltkatastrophen bei Bohrseln (u.a. Deepwater Horizon), Tankern und Pipelines.^{68,69} Zukünftig wird erwartet, dass sich die Umweltschäden pro Barrel Rohöl weiter erhöhen, da zunehmend Öl aus schwerer zu erschließenden Quellen gewonnen wird, wie Ölsanden, Ölschiefer und der Tiefsee.^{70,71}

Kurz- bis mittelfristig ergibt sich durch den Umstieg auf den Batterieantrieb ein wachsender Metallbedarf; dafür werden weniger fossile Brennstoffe verbraucht.¹⁸ Während fossile Energieträger nach der Verbrennung nicht mehr verwertbar sind, können Metalle zunehmend im Kreislauf geführt werden.^{18,22,50} So können Nickel und Kobalt mit einer Rückgewinnungsquote von über 90 % durch das Recycling zurückgewonnen werden.⁵⁵ Die EU-Batterieverordnung schreibt für das Jahr 2031 eine Mindestrecyclingquote von 70 % für Lithium-Ionen-Batterien sowie von 95 % für Nickel und Kobalt und 80 % für Lithium vor.³⁸

Neben dem Recycling der Batterierohstoffe wird erwartet, dass sich die Wiederverwendung von Antriebsbatterien als stationäre Energiespeicher etabliert, womit sich der Ressourcenverbrauch und die Ökobilanz deutlich verbessern.^{72,73,74,75} Dies erklärt, warum sich der Verbrauch abiotischer Ressourcen der beiden Antriebsformen zukünftig angleichen wird.

4. Wie viel Wasser benötigen Batterie- und Verbrennungsantrieb?

Batterieantrieb und Verbrennungsantrieb benötigen Wasser über den gesamten Lebenszyklus, etwa für die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, die Produktion, Nutzung und Entsorgung. Hierbei kann der Wasserverbrauch je nach eingesetzter Technologie sehr stark schwanken und Studien, die den übergreifenden Wasserbedarf ermitteln, sind rar. In der Gesamtschau ergibt sich aber für den Batterieantrieb über den Lebenszyklus ein deutlich geringerer Wasserverbrauch als beim Verbrenner. Für die Herstellung eines Autos mit Verbrennungsantrieb und 1.500 kg Gewicht wird beispielsweise ein Wasserverbrauch von 400.000 Litern geschätzt.^{76,77} Bezieht man die Herstellung einer Lithium-Ionen-Batterie mit 64 kWh mit ein, so sind es noch einmal um die 50.000 Liter mehr.⁷⁸ Hierbei entfällt der Hauptanteil des Wasserverbrauchs auf die Rohstoffe Aluminium, Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt sowie für die Fertigung der elektronischen Bauteile.⁷⁹

Während der Nutzungsphase verbraucht ein Verbrenner-Mittelklassewagen über 200.000 km schätzungsweise zwischen 170.000 und 407.000 Liter Wasser aufgrund der wasserintensiven Kraftstoffbereitstellung.⁸⁰ Ein vergleichbarer Wagen mit Batterieantrieb verbraucht über dieselbe Strecke schätzungsweise zwischen 4.000 und 56.000 Liter Wasser unter der Annahme des deutschen Strommixes, wobei es sich fast ausschließlich um Kühlwasser für fossile Kraftwerke handelt.⁷⁸ Bei Verwendung von Ökostrom geht der Wasserverbrauch des Batterieantriebs während der Nutzung auf nahe Null zurück.⁸¹

Problematisch an der Wassernutzung ist jedoch weniger der mengenmäßige Verbrauch, sondern die beispielsweise mit der Gewinnung von Rohöl oder Lithium verbundenen Umweltprobleme wie die Kontaminierung mit Schadstoffen oder Salz, die Absenkung des Grundwasserspiegels oder die Erwärmung von Oberflächengewässern. Hierbei kommt es stark auf die örtlichen Gegebenheiten und die lokale Wasserverfügbarkeit an.

Beim Batterieantrieb ist insbesondere die Lithiumgewinnung aus Salaren zum Teil mit besonderen Problemen verbunden, da der Großteil aus lithiumhaltigen Salzwasservorkommen in trockenen Gebieten Südamerikas gewonnen wird.^{82,46} Dabei wird beispielsweise unterirdisches Salzwasser gefördert, welches zur Gewinnung des Lithiums an der Oberfläche verdunstet. Sinkt der Salzwasserpegel zu stark, kann Süßwasser nachströmen und sich aufgrund der Salzwasserrückstände kontaminieren.⁴⁶ Durch die Lithiumgewinnung aus Salzwasser können so nicht nur Süßwasserkonflikte unter den dort ansässigen Bevölkerungsgruppen entstehen, auch die Wasserversorgung der regionalen Ökosysteme kann dadurch gefährdet werden.⁴⁶ Technologien wie die Wasserrückgewinnung durch Kondensation des verdunsteten Wassers, die Rückführung der Solemischung nach Gewinnung des Lithiums oder Membrantechnologien zur Abscheidung des Lithiums ohne Verdunstung (wie z.B. Osmoseanlagen) könnten den Wasserverbrauch bei der Lithiumgewinnung zukünftig erheblich reduzieren.⁸³ Auch die Gewinnung von Lithium aus Festgestein oder aus Meerwasser könnte den Wasserverbrauch zukünftig verringern.⁸⁴

Beim Verbrennungsantrieb sind für die Wasserressourcen insbesondere die Ölförderung, vor allem bei der Nutzung von Ölsanden, Fracking-Technologie oder unterseeischen Ölvorkommen sowie die nahezu regelmäßig stattfindenden Ölkatastrophen hochproblematisch.^{47,85} Beispielsweise muss Ölsand aufwendig

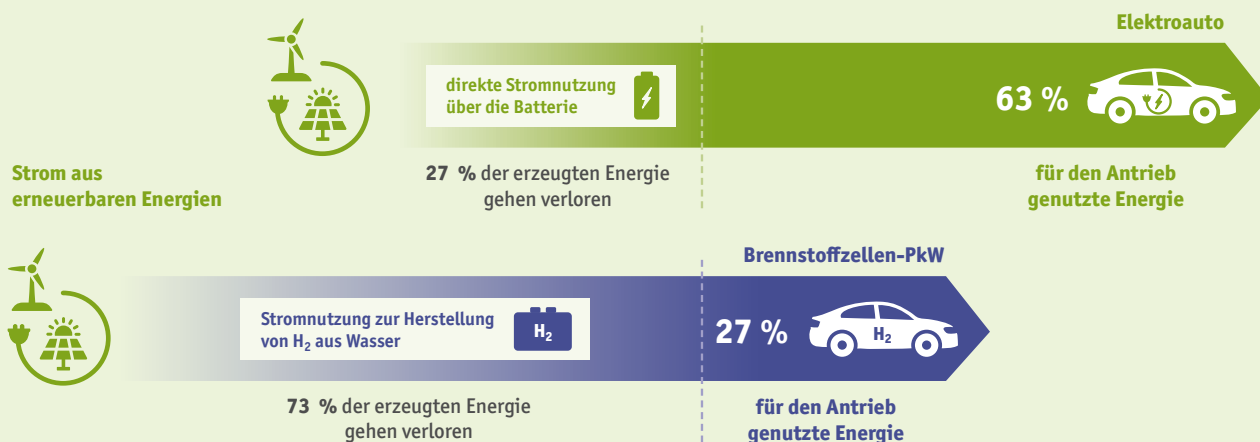
gefördert und mit viel Wasser, Lösungsmittel und Energie zu Rohöl verarbeitet werden. Hierbei fallen pro Barrel (159 Liter) Rohöl 650 Liter giftige Abwässer an, welche Schadstoffe wie Schwermetalle beinhalten.⁸⁶ Diese Formen der wasserabhängigen Erdölgewinnung aus unkonventionellen Quellen werden zukünftig stark steigen.⁸⁷

5. Ist der Wasserstoffantrieb umwelt-schonender als der Batterieantrieb?

Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit Wasserstoff (H₂) betrieben werden, verursachen keine Emissionen und werden deshalb von vielen Akteuren als klimaverträgliche Option propagiert. Hergestellt wird Wasserstoff bisher aber fast ausschließlich aus fossilem Gas, verbunden mit hohen CO₂-Emissionen. Ein alternatives Verfahren stellt die Elektrolyse dar. Dabei wird Wasser (H₂O) in Wasserstoff und Sauerstoff (O₂) gespalten. Die Herstellung von Wasserstoff via Elektrolyse ist energieintensiv und weist während der Herstellung hohe Energieverluste auf.^{88,89} Neben Strom werden zur Wasserstoffproduktion große Mengen aufbereitetes Wasser benötigt sowie Seltene Erden für die Elektrolyseure und ein gewisser Flächenbedarf für die benötigten Produktionsanlagen.¹⁰

Theoretisch könnte der gewonnene Wasserstoff direkt genutzt werden, für die Speicherung und Verteilung muss er allerdings unter zusätzlichem Energieaufwand verdichtet oder verflüssigt werden. Wasserstoff kann in Brennstoffzellen genutzt werden, um Strom zu erzeugen und einen Elektromotor anzutreiben oder in einem Verbrennungsmotor – typischerweise nach weiterer Umwandlung als E-Fuel – verbrannt werden. Mit der Erzeugung und Nutzung von Strom zur Herstellung von Wasserstoff für Brennstoffzellen gehen enorme Umwandlungsverluste einher.^{90,91} Die direkte Nutzung des

Wirkungsgrade: Elektroautos liegen weit vorn



Wirkungsgrad von der Energiequelle bis zu den Rädern bei Batterie- und Wasserstoffantrieb mit Nutzung erneuerbarer Energien.

Quelle: BMUV (2021)²⁶

Stroms in einem Batterieantrieb verbraucht im Vergleich zu einem mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen-Fahrzeug nur etwa halb so viel Strom für den gleichen Weg.^{25,3692} Bei Nutzung erneuerbarer Energien weist ein mit Brennstoffzelle angetriebener Pkw einen Wirkungsgrad von Energiequelle bis zum Rad von 35 % auf und ein Pkw mit Batterieantrieb einen Wirkungsgrad von 75 %.^{25,36}

Grüner Wasserstoff aus erneuerbarem Strom wird bei der Umstellung unserer Wirtschaft von fossilen Energieträgern zu erneuerbaren Energien eine gewisse Rolle spielen. Dies trifft insbesondere für industrielle Prozesse wie in der Stahl- oder Chemieindustrie sowie für den unvermeidbaren Langstrecken-Schiffs- und Flugverkehr zu, da hier Energieträger mit hoher Energiedichte benötigt werden und diese Bereiche nicht elektrifiziert werden können.^{10,12,93,94} Einen effektiven Klimanutzen hat Wasserstoff jedoch nur, wenn er mit Strom aus zusätzlich erzeugten erneuerbaren Energien hergestellt wird und möglichst zielgerichtet und sparsam eingesetzt wird. Da erneuerbare Energien und der mit ihnen produzierte grüne Wasserstoff noch auf lange Sicht knapp sind, sollte die Wasserstoffnutzung den Bereichen vorbehalten bleiben, in denen geeignetere Technologien nicht verfügbar sind, sowie nur als letzte Option nach Ausschöpfung aller Potenziale der Suffizienz und Effizienz zum Einsatz kommen.⁹³ Für den verbleibenden Pkw-Verkehr, der nicht vermieden oder auf umweltschonendere Verkehrsträger verlagert werden kann, ist die direkte Stromnutzung in der Batterie mit Abstand am effizientesten.⁹³ Der zum Teil angenommene Vorteil einer höheren Reichweite von Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen ging durch neue Batterietechnik bereits verloren, bzw. wird dies in Kürze.^{95,96} Die meisten Fahrzeughersteller sind im Pkw-Bereich daher bereits weitestgehend aus der Wasserstofftechnologie – also in erster Linie Brennstoffzellen-Fahrzeugen – ausgestiegen.^{97,98}

6. Können Agrokraftstoffe und E-Fuels eine Lösung darstellen?

Häufig wird behauptet, mit biogenen Kraftstoffen oder synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) könne der Verbrennungsmotor klimaschonend betrieben werden. Tatsächlich können weder biogene Kraftstoffe noch E-Fuels einen wirksamen Beitrag zum Klimaschutz im Pkw-Verkehr leisten.^{11,12}

Biogene Kraftstoffe werden überwiegend aus eigens angebauten Nahrungs- und Futtermittelpflanzen hergestellt. Um selbst kleine Mengen solcher Agrokraftstoffe zu produzieren, müssen auf großen Flächen Ölpflanzen wie Raps oder Soja (für Agrodiesel) bzw. Weizen, Roggen, Mais, Zuckerrüben oder Zuckerrohr (für Agroethanol) angebaut werden. Die Nutzung fruchtbarer Agrarflächen für Kraftstoff steht in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Mit den Flächen, die rund um den Globus derzeit der Produktion von Agrokraftstoff für den deutschen Markt dienen, könnte der Kalorienbedarf von bis zu 35 Millionen Menschen gedeckt werden.⁹⁹ Der Einsatz von Agrokraftstoff treibt den Bedarf an Agrarflächen

massiv in die Höhe und trägt so zum weltweiten Flächenfraß bei, der dazu führt, dass bisher ungenutzte Flächen – häufig wertvolle CO₂-Speicher wie Wälder und Moore – zunehmend in Ackerflächen umgewandelt werden. Durch diese Landnutzungsänderungen entstehen enorme Treibhausgasemissionen, die dazu führen, dass Agrokraftstoffe insgesamt sogar noch klimaschädlicher sind als fossile Kraftstoffe.^{11,100,101} Die intensive Bewirtschaftung der Anbauflächen mit Dünger- und Pestizideinsatz schadet zudem Ökosystemen und der Biodiversität. Die Solarstromerzeugung für E-Fahrzeuge benötigt für die gleiche Kilometerleistung 97 % weniger Fläche als der Anbau von Pflanzen für Agrokraftstoff.¹⁰²

Auch der Einsatz von Kraftstoff aus biogenen Rest- und Abfallstoffen ist keine skalierbare Option für den Pkw-Verkehr. Viele der vorgesehenen Reststoffe können besser stofflich genutzt werden; eine Umleitung der Stoffströme zur Kraftstoffproduktion unterläuft die Abfallhierarchie (bei der energetische Nutzung an letzter Stelle steht) und kann über Verlagerungseffekte hohe indirekte Emissionen verursachen. Die nachhaltig verfügbaren Mengenpotentiale von Rest- und Abfallstoffen sind äußerst begrenzt. Für Deutschland geht das Umweltbundesamt davon aus, dass mit solchen Kraftstoffen unter Berücksichtigung von Nutzungskonkurrenzen und Kosten bestenfalls etwa 1 % des Energiebedarfs im Verkehr abgedeckt werden kann.¹⁰³ Es handelt sich also um eine reine Nischenlösung.

E-Fuels haben ähnliche Eigenschaften wie fossiles Benzin oder Diesel und können prinzipiell in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Vorläufig werden sie jedoch nur in einzelnen Pilotprojekten hergestellt und vor 2030 werden sie nirgendwo in relevanten Mengen verfügbar sein. E-Fuels sind keineswegs automatisch klimafreundlich und ihr Einsatz kann sogar zu hohen Mehremissionen führen. Ihre Herstellung ist äußerst energieintensiv und ihre Klimawirkung ist in höchstem Maße davon abhängig, woher die eingesetzte Energie stammt. Nur auf Basis von zu 100 % zusätzlich erzeugtem erneuerbarem Strom ist ein Klimaschutzbeitrag möglich. Solange der Anteil erneuerbarer Energie im eingesetzten Strommix nicht mindestens 70 - 80 % erreicht, sind sie klimaschädlicher als fossiler Diesel.¹²

Die E-Fuel-Produktion benötigt also gewaltige Mengen Ökostrom. Aufgrund der hohen Energieverluste und der geringen Effizienz des Verbrennungsmotors beträgt der Wirkungsgrad bei Einsatz in einem Verbrennerfahrzeug nur 15 % – im Vergleich zu 75 % beim Batterieantrieb.^{25,26,27,104,105} Erneuerbarer Strom aber ist das Fundament der gesamten Energiewende, er ist weltweit knapp und kostbar und wird das noch auf lange Sicht bleiben. Er muss daher zielgerichtet so eingesetzt werden, dass maximaler Klimanutzen entsteht. Jede Kilowattstunde Ökostrom bringt in direktelektrischen Anwendungen (im Stromsektor, für E-Fahrzeuge oder Wärmepumpen) mit Abstand die größte Emissionseinsparung. Kostbaren Ökostrom zur Produktion von E-Fuels für Verbrennerautos statt für die Dekarbonisierung des Energiesektors zu verwenden, wäre daher keine Entlastung, sondern eine zusätzliche Belastung für das Klima.

7. Wie können Reuse und Recycling

Batterien umweltverträglicher machen?

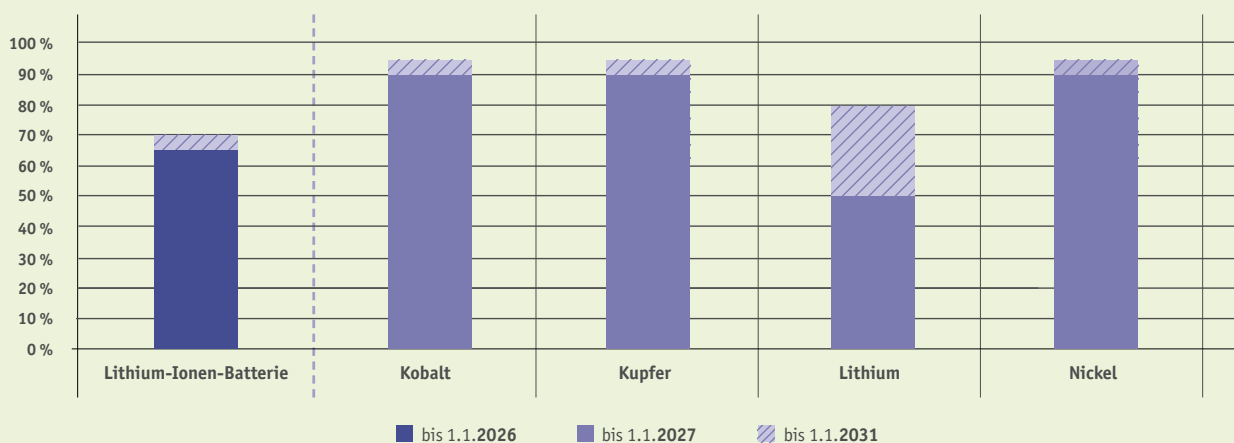
Die End-of-Life-Phase verursacht – bei gutem Abfallmanagement – selbst nur geringe Umweltemissionen und kann durch Wiederverwendung und Recycling die Ökobilanz des Batterieantriebs erheblich verbessern. Hierbei ist die Wiederverwendung besonders anzustreben, da so praktisch keine neuen Rohstoffe benötigt werden und durch Aufbereitungs- und Reparaturmaßnahmen die Lebensdauer von Batterien erheblich verlängert wird.^{106,107,108} Batterien der Elektromobilität haben ein großes Potential zur Wiederverwendung, da sie am Ende ihres Einsatzes als Antriebsbatterie noch über rund 70 % ihrer ursprünglichen Kapazität verfügen.¹⁰⁹ Anschließend können sie für weitere 7 bis 10 Jahre als stationäre Energiespeicher oder für weniger anspruchsvolle Mobilitätsanwendungen genutzt werden.^{22,109} Stationäre Energiespeicher sind ein wichtiger Bestandteil der Energiewende mit stark steigendem Bedarf.¹¹⁰

Damit eine Antriebsbatterie wiederverwendet werden kann, muss der Gesundheitszustand (State of Health), also vor allem die Restkapazität bekannt sein und das Batteriemanagementsystem ausgelesen und ggf. für den neuen Einsatzzweck verändert werden können. Zudem muss die Batterie einfach ausgebaut werden können und einzelne Komponenten wie Batteriemodule, Elektronik und Gehäuse sollten als Ersatzteile verfügbar sein. Zudem sind unter Umständen Software-Updates erforderlich. Aktuell erschweren unter anderem der geringe Marktrücklauf, die vielen unterschiedlichen Batterietypen,

Zugangssperren, fehlende Standards und uneinheitliche Datenformate die Wiederverwendung von Antriebsbatterien oder machen diese unwirtschaftlich. In der EU-Batterieverordnung wurden bereits einige wesentliche Verbesserungen getroffen, jedoch wird erwartet, dass der Abbau weiterer Hemmnisse notwendig ist, um das Wiederverwendungspotenzial von Antriebsbatterien auszuschöpfen.

Über die Wiederverwendung hinaus bietet das Recycling die Möglichkeit wichtige Schlüsselrohstoffe wie Kobalt, Lithium und Nickel zurückzugewinnen.^{111,112} Derzeit stammen die meisten Batterierohstoffe aus primären Quellen, wodurch die Gewinnung mit erheblichen negativen Umweltwirkungen verbunden ist. Im Jahr 2035 könnten jedoch bereits über ein Fünftel des Lithiums und 65 % des Kobalts für die Batterieherstellung aus dem Recycling stammen.²² Die EU-Batterieverordnung schreibt bis 2031 Mindestrecyclingquoten von 80 % für Lithium, 95 % für Kobalt und Nickel sowie von 70 % für die gesamte Batterie vor. Zusätzlich sollen der verpflichtende Batteriepass mit Informationen über die Materialzusammensetzung der Batterie und Mindestquoten für den Anteil von Recyclingmaterial bei der Batterieherstellung das Recycling fördern. Voraussetzung für das Recycling ist die ordnungsgemäße Erfassung der Altbatterien, hier erproben einzelne Unternehmen Leasing-Modelle, bei denen die Batterie nicht gekauft sondern gemietet wird.¹¹³ Neue Batterietypen mit einem geringeren Anteil hochpreisiger Rohstoffe werden zudem einen weiteren Forschungseinsatz erfordern, um auch zukünftig Recyclingprozesse wirtschaftlicher und materialeffizienter zu machen.⁵⁵

Recyclingquoten lt. EU-Batterieverordnung



Recyclingquoten für Lithium-Ionen-Batterien und spezifische Materialien der Lithiumbatterie nach der neuen EU-Batterieverordnung.

Quelle: EU-Batterieverordnung (2022)⁴⁸

Endnoten

- 1 Sachverständigenrat für Umweltfragen (2022) *Wie viel CO₂ darf Deutschland maximal noch ausstoßen? Fragen und Antworten zum CO₂-Budget*
- 2 Expertenrat für Klimafragen (2022) *Zweijahresgutachten 2022*
- 3 Bundesregierung (13.07.2022) *Sofortprogramme für Gebäude und Verkehr*
- 4 Umweltbundesamt (20.05.2022) *Klimaschutz im Verkehr*
- 5 EEA (2020) *Air Quality Report*
- 6 Deutsche Umwelthilfe (19.01.2023) *Mobilitätswende*
- 7 Klimareporter (25.01.2022) *15 Millionen Autos weniger!*
- 8 Umweltbundesamt (26.09.2022) *Die Stadt für Morgen: Die Vision*
- 9 DUH (2020) *Hintergrundpapier Deutsche Umwelthilfe „Plug-In Hybride“*
- 10 Deutsche Umwelthilfe (2020) *Grüner Wasserstoff und Power-to-X Ideen für eine Wasserstoffstrategie mit Zukunft*
- 11 DUH (2022) *Faktencheck – Mythen der Biosprit-Lobby*
- 12 DUH (2021) *Mythenpapier: E-Fuels für Pkw*
- 13 Kraftfahrt-Bundesamt (2022) *Jahresbilanz 2022*
- 14 The International Council on clean Transportation (2021) *A Global Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars*
- 15 Wissenschaft.de (20.04.2022) *Aus welchen Teilen besteht ein Auto?*
- 16 European Environment Agency (2018) *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives – TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report, No 13/2018*
- 17 Yang, Y. et al. (2022) *Life Cycle Prediction Assessment of Battery Electrical Vehicles with Special Focus on Different Lithium-Ion Power Batteries in China*
- 18 Öko-Institut e.V. (2021) *Resource consumption of the passenger vehicle sector in Germany until 2035 – the impact of different drive systems*
- 19 ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V. (2010) *Motoren und geregelte Antriebe Normen und gesetzliche Anforderungen an die Energieeffizienz von Niederspannungs-Drehstrommotoren*
- 20 Ingenieur.de (27.04.2012) *Hersteller von Antriebstechnik fürchten Rohstoff-Knappheit*
- 21 Amund N. Løvik et al. (2021), *Material composition trends in vehicles: critical raw materials and other relevant metals. Preparing a dataset on secondary raw materials for the Raw Materials Information System*
- 22 Transport & Environment (2021) *From dirty oil to clean batteries – Batteries vs. oil: a systematic comparison of material requirements*
- 23 Chemietechnik.de (09.11.2022) *Vergleich von Kathodenchemien für Elektrofahrzeug-Batterien*
- 24 Sun X. et al. (2019) *Technology Development of Electric Vehicles: A Review*
- 25 Wietschel Dr. M. (2021) *DUH Webkonferenz „Die EU-Batterieverordnung: Ein Schlüssel für nachhaltige Batterien und die Mobilitätswende, 22. Juni 2022*
- 26 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (01.10.2021) *Effizienz und Kosten: Lohnt sich der Betrieb eines Elektroautos?*
- 27 European Commission (2020) *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA*
- 28 Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) (2021) *Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse*
- 29 CleanTechnica (01.02.2021) *Chart: Why Battery Electric Vehicles Beat Hydrogen Electric Vehicles Without Breaking A Sweat*
- 30 Deutsche Umwelthilfe e.V. (13.01.2023) *Schadstoffe*
- 31 Pipitone E., Caltabellotta S., Occhipinti L. (2021) *A Life Cycle Environmental Impact Comparison between Traditional, Hybrid, and Electric Vehicles in the European Context, Sustainability 2021, 13, 10992. <https://doi.org/10.3390/su131910992>*
- 32 Öko-Institut, <https://www.oeko.de/forschung-beratung/themen/mobilitaet-und-verkehr/elektromobilitaet-e-autos-plug-in-hybride-und-batterien>
- 33 Transport & Environment (2022) *UPDATE – T&E's analysis of electric car lifecycle CO2 emissions*
- 34 Fritz D., Heinfellner H., Lambert S. (2021) *Die Ökobilanzen von Personenkraftwagen – Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO₂-reduktionspotential und Energieeinsparung*
- 35 Clean Energy Wire (20.12.2022) *Germany's energy consumption and power mix in charts*
- 36 Vgl. E-fahrer (16.01.2023) *TV-Professor Harald Lesch rechnet nach: Seine Einschätzung zu E-Autos überrascht*
- 37 Picatoste A., Justel D., Mendoua J. M. F. (2022) *Circularity and life cycle environmental impact assessment of batteries for electric vehicles: Industrial challenges, best practices and research guidelines, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112941>*
- 38 EU Commission (2020) *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020*
- 39 Deutsche Umwelthilfe (09.09.2021) *Deutsche Umwelthilfe fordert zur IAA deutschen Verbrenner-Ausstieg 2025 und strengere Vorgaben für E-Autobatterien*
- 40 ECOS (10.01.2023) *Electric vehicles*
- 41 Transport & Environment (10.01.2023) *Cars*
- 42 Vgl. Greenpeace - *THE LEAP TO ELECTRIC A STEP ON THE PATH TOWARDS SUSTAINABLE TRANSPORT*
- 43 Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (12.07.2022) *Die Zukunft des Autos: Mit Elektroantrieb zur Nachhaltigkeit?*

- 44 Hawkins T. R. et al (2012) Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles, <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- 45 Umweltbundesamt (2013) Luft und Verkehr - Datenbankauszug aus der Umweltforschungsdatenbank UFORDAT
- 46 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2020) Lithium – Informationen zur Nachhaltigkeit
- 47 Greenpeace (06.01.2023) Ölkatastrophen weltweit
- 48 European Commission (09.12.2022) Batteries
- 49 Corporate sustainability reporting (10.01.2023) https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en
- 50 Springer Professional (31.08.2021) Ressourcenverbrauch von E-Motor und Verbrenner im Vergleich
- 51 European Commission (2020) Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., et al., Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA: final report
- 52 Umweltbundesamt (2016), Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen
- 53 Öko-Institut e.V. (2017) FAQ Elektromobilität.
- 54 Deutsche Rohstoffagentur DERA (2021): Batterierohstoffe für die Elektromobilität. – DERA Themenheft: 26 S.; Berlin
- 55 Fraunhofer ISI (2020) Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf
- 56 Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen
- 57 Balakrishnan, N.T.M. et al. (2021) Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) as High-Performance Cathode Material for Lithium Ion Batteries. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63791-0_2
- 58 Forbes.com (04.10.2022) - A Cheaper Chemistry Is Storming The Battery Market
- 59 Jiang, Y. et al. (2020) Optimal configuration of battery energy storage system with multiple types of batteries based on supply-demand characteristics.
- 60 Kandarr, J. (2018) Kann Kobalt zukünftig in Batterien ersetzt werden? <https://doi.org/10.2312/eskp.2018.2.4.9>
- 61 Hwang et al. (2017) Sodium-ion batteries: present and future
- 62 Fraunhofer ISI (2017) Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien
- 63 Elektroauto-News (14.02.2022) Renault und Valeo entwickeln E-Motor ohne seltene Erden
- 64 Fraunhofer ISI (2010) Kupfer für Zukunftstechnologien Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität
- 65 Zhou X. et al. (2018) Research Review on the Energy-saving Technologies for Asynchronous Motors. doi:10.1109/ICMA.2018.8484643.
- 66 Rohölverbrauch nach eigener Berechnung der DUH unter folgenden Annahmen: Lebensdauer 200.000 km, aus 100 l Rohöl entstehen 23 l Benzin, Benzinverbrauch 7,4 l/100 km nach: Prussi, M. et al (2020) JEC Well-to-Tank report V5, <http://dx.doi.org/10.2760/959137>; UBA (31.01.2022) Kraftstoffverbrauch
- 67 Hirz, M., Nguyen T. T. (2022) Life-Cycle CO₂-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems <https://doi.org/10.3390/vej13040061>
- 68 BUND (06.01.2023) Wasser und Öl – eine schlechte Mischung: die Ölförderung ist eine Katastrophe für die Nordsee
- 69 Wikipedia (06.01.2023) Liste bedeutender Ölunfälle
- 70 Pan, Y. et al. (2012) Review on Technologies for Oil Shale Surface Retort
- 71 Finkel, M. L. (2018) The impact of oil sands on the environment and health
- 72 Richter, S., Rehme, M., Temmler, A., Götz, U. (2017) Zweitvermarktung von Traktionsbatterien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18613-5_9
- 73 Braun N. et al. (2021) Chancen und Risiken im Automobilsektor für die Umsetzung einer klimaneutralen und ressourcen-effizienten zirkulären Wirtschaft.
- 74 European Commission (2021) Circular Economy Perspectives for the Management of Batteries used in Electric Vehicles
- 75 Kamath, D. et al. (2020) Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications
- 76 Naturfreunde (06.01.2023) Virtuelles Wasser und Mobilität
- 77 Zeit (08.05.2017) Wie viel Wasser verbrauchen wir?
- 78 Wasserverbrauch Batterieantrieb nach eigenen Berechnungen der DUH unter folgenden Annahmen: Lebensdauer 200.000 km, Batteriekapazität 64 kWh, Stromverbrauch 14,7 kWh/100 km, Laden mit Strommix Deutschland 2022, Wasserverbrauch der Produktion 1 kWh NMC111 = 752 l und nach: Dai, Q. et al. (2019) Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>; Spang, E. S., et al. (2014) The water consumption of energy production: an international comparison <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105002>; Clean Energy Wire (20.02.2022) Germany's energy consumption and power mix in charts, EnBW (07.03.2022) Wie hoch ist der Stromverbrauch von Elektroautos?
- 79 Dai, Q. et al. (2019) Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>
- 80 Wasserverbrauch Verbrennungsantrieb nach Eigenen Berechnungen der DUH unter folgenden Annahmen: Lebensdauer 200.000 km, Benzinverbrauch 7,4 l/100km, aus 100 l Rohöl entstehen 24 l Benzin, Wasserbedarf pro Liter Rohöl 2,8 – 6,6 L und nach: Wu, M. et al. (2009) Water Consumption in the Production of Ethanol and Petroleum Gasoline. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9370-0>; Prussi, M. et al (2020) JEC Well-to-Tank report V5, <http://dx.doi.org/10.2760/959137>; UBA (31.01.2022) Kraftstoffverbrauch
- 81 Spang, E. S., et al. (2014) The water consumption of energy production: an international comparison <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105002>
- 82 Friends of the Earth Europe (2012) UNDER PRESSURE - How our material consumption threatens the planet's water resources
- 83 VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (2021) Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung in Europa - Wie nachhaltig sind Batterien und Elektromobilität wirklich?
- 84 Fuchsbriefer (22.06.2021) Lithium aus Meerwasser
- 85 Tagesspiegel (04.12.2019) Tesla-Akkus: Wenn elf Avocados umweltschädlicher als eine E-Auto-Batterie sind
- 86 Greenpeace (2020) Ölsandabbau in Kanada: dramatische ökologische und klimatische Auswirkungen
- 87 IEA (2019) World Energy Outlook

- 88 Bossel, U. (2006) Wasserstoff löst keine Energieprobleme, *European Fuel Cell Forum*
- 89 Öko-Institut e.V. (2019) Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland. Zusammenfassung und Einordnung des Wissensstands zur Herstellung und Nutzung strombasierter Energieträger und Grundstoffe
- 90 ZDF (22.06.2021) *Brandbrief an die EU: Kampagne gegen das E-Auto?*
- 91 Umweltbundesamt (09.08.2022) *Wasserstoff im Vergleich: Häufig gestellte Fragen*
- 92 Öko-Institut e.V. (2020) FAQ: Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe
- 93 Umweltbundesamt (18.05.2022) Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem
- 94 Rosenstiel, A. et al. (2022) Wasserstoff als zentraler Baustein der Sektorenkopplung
- 95 Springer Professional (16.11.2020) *Neue Li-Ion-Akkus verdreifachen Reichweite von E-Autos*
- 96 Science Daily (20.07.2020) *Battery breakthrough gives boost to electric flight and long-range electric cars*
- 97 Volkswagen (07.11.2019) *Wasserstoff oder Batterie? Bis auf Weiteres ein klarer Fall*
- 98 Efahrer (16.12.2021) *Wasserstoff-Blase geplatzt: Das ist Toyotas krasser neuer Elektro-Plan*
- 99 Deutsche Umwelthilfe e.V. (23.11.2022) *Umweltverbände decken auf: Anbauflächen für Agrokraftstoffe könnten Kalorienbedarf von bis zu 35 Millionen Menschen decken*
- 100 Fahrenbach H., Bück S. (2022) Carbon opportunity costs of biofuels in Germany – An extended perspective on the greenhouse gas balance including foregone carbon storage, <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.941386>
- 101 DUH (2022) *Hohe Klimakosten durch vermeintlich grüne Agrokraftstoffe*
- 102 Ifeu (2022) *CO2-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen in Deutschland*
- 103 UBA (2019) *BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor), Texte I 115/2019*
- 104 Transport & Environment (23.06.2022) *Neue Analyse bestätigt: Autos mit E-Fuels sind weit weniger umweltfreundlich als Elektroautos*
- 105 Öko-Institut (2020) *Nicht die erste Wahl – Strombasierte Kraftstoffe im Verkehrssektor*
- 106 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (17.07.2020) *Ressourcenbilanz: Welchen Rohstoffbedarf haben Elektroautos?*
- 107 e-mobil BW GmbH Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg (2019) *Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien Herausforderungen und Lösungsansätze*
- 108 Ziemann, S. et al. (2017) *A critical analysis of material demand and recycling options of electric vehicles in sustainable cities*
- 109 Núria, Dr. G. G. (2022) *Upcycle batteries. Avert climate change, DUH Webconference "The EU Batteries Regulation: How can we ensure sustainable batteries for the mobility transition?"*, 05th July 2022
- 110 Fluxicon (2022) Frank M. (05.12.2022) *Second-Life: Potentiale und Anwendungsmöglichkeiten – Beitrag zum Webinar im Rahmen des Forschungsprojekts „Fluxicon“*
- 111 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (2022) *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - Lithium-Ionen-Batterierecycling in Deutschland und Europa*
- 112 Öko-Institut (2019) *Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarf für die globale Elektromobilität bis 2050*
- 113 Renault Financial Services (13.01.2023) *Tarife*

Diese Veröffentlichung wurde vom Venture und Nature Fund (VNF) unterstützt. Die Verantwortung für die in diesem Infopapier dargelegten Informationen und Ansichten liegt bei den Autoren. Der Fördermittelgeber kann nicht für die Verwendung der darin enthaltenen oder ausgedrückten Informationen verantwortlich gemacht werden.



Venture and Nature Fund

Stand: 31.01.2023



Deutsche Umwelthilfe e.V.

Bundesgeschäftsstelle Radolfzell
Fritz-Reichle-Ring 4
78315 Radolfzell
Tel.: 07732 9995-0

Bundesgeschäftsstelle Berlin
Hackescher Markt 4
10178 Berlin
Tel.: 030 2400867-0

Ansprechpartner

Philipp Sommer
Stv. Leiter Kreislaufwirtschaft
Tel.: +49 30 2400867-462
E-Mail: sommer@duh.de

Dorothee Saar
Leiterin Verkehr und Luftreinhaltung
Tel.: 030 2400867-72
E-Mail: saar@duh.de

www.duh.de info@duh.de [Twitter](#) [Facebook](#) [Instagram](#) [LinkedIn](#) [YouTube](#) [WhatsApp](#) [umwelthilfe](#)

Wir halten Sie auf dem Laufenden: www.duh.de/newsletter-abo

Die Deutsche Umwelthilfe e.V. ist als gemeinnützige Umwelt- und Verbraucherschutzorganisation anerkannt. Wir sind unabhängig, klageberechtigt und kämpfen seit über 40 Jahren für den Erhalt von Natur und Artenvielfalt. Bitte unterstützen Sie unsere Arbeit mit Ihrer Spende: www.duh.de/spenden

Transparent gemäß der Initiative Transparente Zivilgesellschaft. Ausgezeichnet mit dem DZI Spenden-Siegel für seriöse Spendenorganisationen.



Initiative
Transparente
Zivilgesellschaft



Unser Spendenkonto: Bank für Sozialwirtschaft Köln | IBAN: DE45 3702 0500 0008 1900 02 | BIC: BFSWDE33XXX