



Umwelteffekte von Elektromobilität

INHALTSVERZEICHNIS

TEIL 1	ELEKTROAUTO & PKW MIT VERBRENNUNGSMOTOR IM VERGLEICH	5
1.	Fahrzeugherstellung	5
1.1	Lithium-Ionen Akkus und ihre Inhaltsstoffe	9
1.2	Herstellung von Traktionsbatterien	12
1.3	Seltene Erden in der Elektromobilität	16
1.4	Weiterentwicklung der Traktionsbatterien in naher Zukunft	17
1.4.1	Lithium-Ionen-Batterien mit Silizium-Anoden	17
1.4.2	Lithium-Feststoff-Batterien	17
1.4.3	Natrium-Ionen-Batterien	19
2.	Umwelteffekte im Fahrbetrieb	21
2.1	Umwelteffekte in der Ölförderung	24
3.	Nachnutzung der Traktionsbatterie	26
4.	Entsorgung und Recycling	28
5.	Umwelteffekte über die gesamte Lebensdauer	30
TEIL 2	WAS WÄRE WENN...	32
1.	Herausforderungen für die Elektrifizierung	32
2.	Mögliche Maßnahmen	34
3.	Schlussfolgerungen	36
	Quellen	39
	Impressum	40

Die Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) des Sektors Mobilität sind gegen den Trend der übrigen Sektoren bis 2021 gestiegen. Damit wurden die erzielten THG-Reduzierungserfolge der anderen Sektoren weitgehend zunichte gemacht. 2022 konnte endlich eine Trendwende eingeläutet werden: Die THG-Emissionen Österreichs gehen zurück: Die Emissionen aus dem Verkehrssektor waren 2022 um 4,8 % geringer als 2021, die THG-Gesamtemissionen Österreichs gingen im selben Zeitraum sogar um 5,8 % zurück. Für 2023 prognostiziert das Umweltbundesamt einen Rückgang in ähnlicher Größenordnung. Damit schwenkt auch Österreich auf den Pfad Richtung Klimaneutralität 2040 ein. Elektrofahrzeuge sind ein wesentlicher Grund für die Trendwende im Verkehrsbereich.

Um ein umfassendes Bild von Vorteilen, Nachteilen und Grenzen der Elektromobilität zu zeichnen, werden im ersten Teil dieser Broschüre die Umwelteffekte bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von batterieelektrischen Fahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren beschrieben.

Je höher die tägliche Fahrleistung, desto größer der Vorteil des Elektroantriebs. Die folgende Gegenüberstellung nimmt deshalb die kritischste und gleichzeitig am weitesten verbreitete Fahrzeugklasse in den Blick: den Kompakt-Pkw.

Die zentralen Auswirkungen des Verkehrs auf die Umwelt sind Luftschadstoffe, Treibhausgase sowie Rohstoff- und Platzverbrauch.

Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub gefährden unsere Gesundheit unmittelbar. Auch in Ländern wie Deutschland und Österreich sterben heutzutage

tage doppelt so viele Menschen an Luftschadstoffen aus dem Verkehr als durch Verkehrsunfälle (Lelieveld 2015).

Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO₂) verstärken den Klimawandel und stellen dadurch eine Gefährdung für die gesamte Menschheit dar.

Neben den Luftschadstoffen und Treibhausgasen sind auch die mit dem Abbau der Rohstoffe verbundene Umweltverschmutzung, die sozialen Auswirkungen, der Landschaftsverbrauch und der mit all diesen Effekten verbundene Rückgang der Artenvielfalt die wichtigsten Auswirkungen, auf die im ersten Teil der Broschüre eingegangen wird.

Im zweiten Teil wird der Frage nachgegangen, was eine weitgehende Umstellung auf Elektrofahrzeuge in Vorarlberg bedeutet: Wieviel fossile Treibstoffimporte können wir sparen, wie viel Strom wird zusätzlich benötigt und wie können wir diesen Strom selber herstellen?

Elektroauto & Pkw mit Verbrennungsmotor im Vergleich

1. Fahrzeugherstellung

Die Umwelteffekte der Fahrzeugherstellung beginnen bei der Gewinnung der Rohstoffe, der Weiterverarbeitung zu Werkstoffen, dem Transport und der Teileherstellung und enden bei der Fahrzeugmontage. Entlang dieser gesamten Prozesskette wird Energie- und Wasser verbraucht, Boden für Fabriken und Infrastruktur versiegelt, Luftschadstoffe, Lärm und Abfälle entstehen. Das alles wird in den Bilanzen der Fahrzeugherstellung zugerechnet.

Der größte Unterschied bei der Herstellung der Elektro-Pkw im Vergleich zu Pkw mit Verbrennungsmotor ist die Traktionsbatterie, die Rohstoffe wie Graphit, Nickel, Lithium, Mangan, Aluminium und manchmal auch Kobalt erfordert. Die Batterie ist auch verantwortlich für das deutlich höhere Fahrzeuggewicht des Elektro-Fahrzeugs, denn sie wiegt je nach Größe zwischen 400 und 700 kg. Maßgeblichen Einfluss auf den Treibhauseffekt bei der Batterieherstellung hat die Batteriegröße (angegeben in kWh) und der bei der Herstellung verwendete Strommix.

Das österreichische Umweltbundesamt macht regelmäßig eine umfassende Gesamtbilanz zu Pkw mit alternativen Antriebskonzepten. Dabei werden Fahrzeuge

der Kompaktklasse (z.B. VW-Golf) mit einem Eigengewicht des Fahrzeugs (ohne Batterie) von 1.300 bis 1.600 kg und einer Batteriegröße von 50 kWh mit verschiedenen Antriebsformen in Herstellung, Betrieb und Entsorgung miteinander verglichen.

Die Gesamtemissionen in $\text{CO}_{2\text{äq}}$ für die Herstellung eines Pkw mit Benzinmotor in Europa wird dabei mit rund 10 t abgeschätzt. Der Dieselantrieb spielt in dieser Fahrzeugklasse nur noch eine untergeordnete Rolle, der Herstellungsaufwand für einen Diesel Pkw liegt aufgrund des größeren Motors bei rund 11 t $\text{CO}_{2\text{äq}}$.

Die Herstellungsemissionen für ein E-Auto ohne die Batterie liegen ebenfalls bei 10 t, für die Batterie kommen dann allerdings weitere 4,1 t THG-Emissionen dazu. In der Bilanz wird für den Akku ein Strommix aus Fernost zu Grunde gelegt, weil die Batterien (vor allem die Batteriezellen) auch für E-Autos aus europäischer Produktion noch zum überwiegenden Teil in Fernost (vor allem China, aber auch Korea, Japan) hergestellt werden.

Mehrere Batterie-Fabriken in Europa sind gerade in Bau, ab 2024 werden sie nennenswerte Kapazitäten liefern. Häufig sind diese Fabriken Ableger fernöstlicher Zellproduzenten, mit Northvolt (Schweden) oder Saft (Frankreich) werden künftig aber auch europäische Hersteller am Markt teilnehmen. Zudem haben Fahrzeughersteller wie VW und Tesla eine eigene Zellproduktion in Europa angekündigt.

Die THG-Bilanz des Umweltbundesamtes ist eine Momentaufnahme, da die Industrie große Anstrengungen unternimmt, die THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung und auch der Batterieherstellung, einschließlich der Rohstoffbeschaffung, zu reduzieren. So vermerkt das Umweltbundesamt in der Studie, dass heute schon deutlich niedrigere THG-Emissionen möglich wären – eine Batterie-

produktion mit europäischem Strommix würde z.B. die Emissionen gegenüber dem Wert in der Grafik in etwa halbieren.

Neue Fertigungstechnologien wie das Trocken-Beschichtungsverfahren und die Verwendung von aufbereiteten Rohstoffen aus alten Batterien wird den Energieaufwand für die Zellherstellung weiter reduzieren.

Der dritte große Hebel zur Reduktion der THG-Emissionen bei der Herstellung eines Elektrofahrzeugs sind kleinere, leichtere Fahrzeuge, die bei gleicher Reichweite mit kleineren Akkus betrieben werden könnten.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Batterie eines Elektrofahrzeugs aktuell die THG-Emissionen der Herstellung deutlich erhöhen. Dieser ökologische Nachteil wird bei der Betankung mit Ökostrom während der ersten Betriebsjahre des Fahrzeugs in der Regel abgebaut. Mehr dazu im folgenden Abschnitt.

Ähnliches gilt übrigens auch für das Brennstoffzellen-Auto, das zwar einen kleineren Akku, dafür aber Brennstoffzellen und Wasserstofftanks mit an Bord hat. Bei der Produktion der Brennstoffzelle und des Wasserstoff-Tanks (hier vor allem durch die Ummantelung des auf 700 bar ausgelegten Gastanks mit hochfesten Kohlenstoff-Fasern) entstehen eine ähnliche Menge an Treibhausgasen wie bei der Akkuherstellung eines Elektrofahrzeugs. Das Brennstoffzellenfahrzeug tut sich allerdings wesentlich schwerer, diesen CO₂-Rucksack im Betrieb abzubauen, weil der Energieverbrauch pro Kilometer deutlich höher als beim batterieelektrischen Fahrzeug ist.

In Fahrzeugen mit Plug-in-Hybridantrieb wird der Verbrennungsmotor mit einem kleinen elektrischen Antriebsstrang und einer kleinen Batterie kombiniert. Ziel dieses Antriebs ist, einen Teil der Bremsenergie zurückzugewinnen und

kurze Strecken emissionsarm fahren zu können. Die THG-Emissionen der Herstellung dieser Fahrzeuge liegen bei 13 bis 14 t CO₂_{äq} und damit zwischen Fahrzeugen mit reinen Verbrennungsmotoren und reinen Elektrofahrzeugen. In der Gesamtbilanz über die Lebensdauer sind sie mit 55 t THG-Emissionen etwas besser als Kompakt-Fahrzeuge mit reinem Verbrennungsmotor (58 t) aber deutlich schlechter als reine Elektrofahrzeuge (15 t).

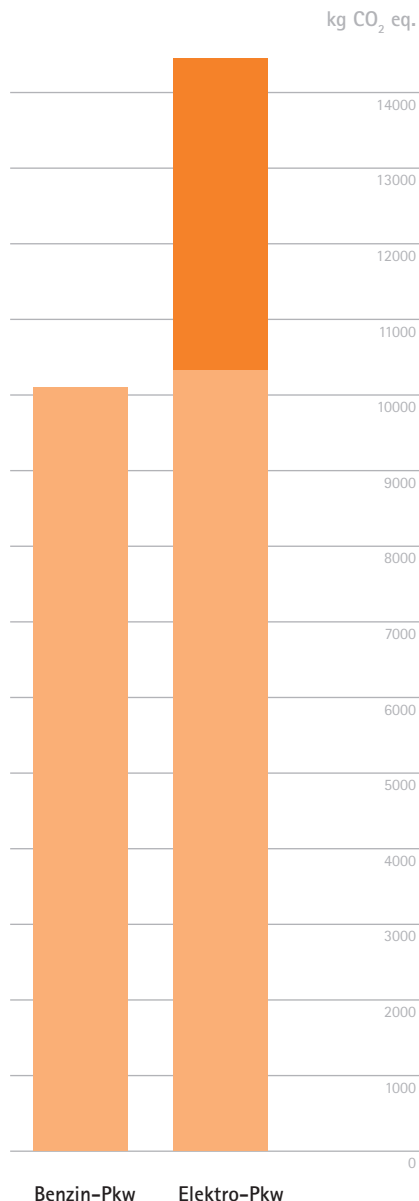
Batterien zur Stromspeicherung spielen bei allen Arten von alternativen Antrieben (Plug-in-Hybrid, Brennstoffzelle und batterieelektrischem Antrieb) eine zentrale Rolle. Im Folgenden wird deshalb auf die Funktionsweise und Umwelteffekte der Batterien detaillierter eingegangen.

Herstellung Fahrzeug
und Antriebsstrang ■

Herstellung Akku ■

Berechnungsbasis: Pkw in der Kompaktklasse
50 kWh Akkukapazität

Umweltbundesamt 2021



1.1 Die Lithium-Ionen-Batterie

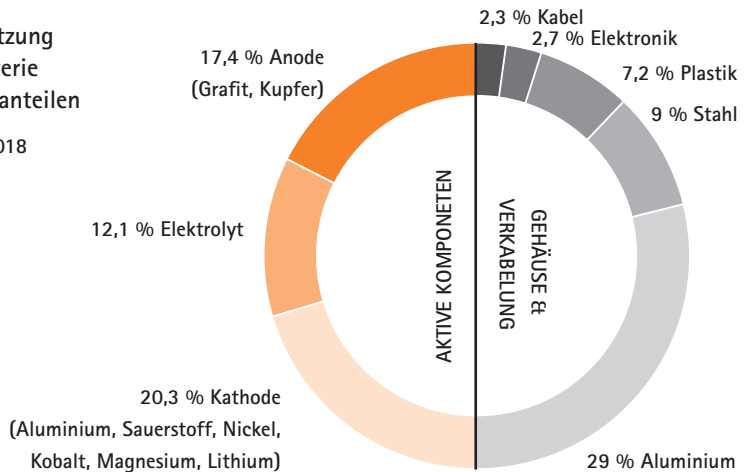
Die Lithium-Ionen-Batterie besteht im Wesentlichen aus drei Elementen:

- Negativ geladene Anode aus Grafit
- Elektrolyt für den Transport geladener Teilchen, meist Lithium-Salze gelöst in einem organischen Lösungsmittel
- Positiv geladene Kathode: hier gibt es verschiedene Zusammensetzungen je nach Batterietyp

Die aktiven Materialien (Anode, Kathode, Elektrolyt) machen rund die Hälfte des Batteriegewichts aus; die andere Hälfte besteht aus dem Gehäuse und den elektrischen Kontakten, d.h. aus Aluminium, Kupfer und verschiedenen Kunststoffen. Um die Energiedichte zu steigern, wird nicht nur an der Zellchemie intensiv geforscht, sondern auch an der Packung der Zellen in der Batterie und der Integration des Batteriegehäuses in das Fahrzeug als statisch wirksames Element.

Zusammensetzung Traktionsbatterie nach Massenanteilen

Thomas et al 2018



Wenn die Batterie vollständig geladen ist, befinden sich die Li-Ionen an der Grafit-Anode. Bei der Entnahme von Strom aus der Batterie wandern die Li-Ionen im Elektrolyten durch eine Membran, die die Kathode von der Anode trennt und nur für Li-Ionen durchlässig ist, zur Kathode und lagern sich dort an.

Die Lithium-Ionen-Batterien wurden erstmals 1980 in Oxford erfolgreich hergestellt (Prof. Goodenough, Nobelpreis 2019) und ab etwa 1990 durch Sony zur Serienreife entwickelt, um tragbare Geräte wie Videorecorder mit Strom zu versorgen. Diese ersten Batterien hatten Kathoden aus Kobaltoxid.

Von 2010 bis 2021 setzte in Folge der breiten Verwendung der Lithium-Ionen-Batterien in Laptops und Mobiltelefonen eine stürmische Weiterentwicklung ein, bei der die Herstellkosten von rund 800 \$/kWh auf aktuell rund 150 \$/kWh reduziert werden konnten (International Energy Agency 2022). Das war eine wichtige Voraussetzung, um das batterieelektrische Fahrzeug wirtschaftlich möglich zu machen.

Lithium-Ionen-Batterien benötigen rund 1 kg Lithium zur Speicherung von 10 kWh elektrischer Energie. Je nach Batteriegröße sind deshalb zwischen 4 und 10 kg Lithium in einem batterieelektrischen Fahrzeug verbaut. Das Lithium ist einerseits im Elektrolyt enthalten und wandert andererseits in Form von Lithium-Ionen beim Laden und Entladen zwischen Anode und Kathode hin und her.

Anode und Elektrolyt sind für alle bisher in Elektrofahrzeugen eingesetzten Batterien sehr ähnlich. Die Kathoden unterscheiden sich je nach Zelltyp jedoch stark. Da die Materialkosten weit mehr als die Hälfte der Herstellkosten der Batteriezellen ausmachen, wurde das teure Kobalt in der Kathode schrittweise durch ähnliche Metalle wie Mangan und Nickel ersetzt: So entstanden die Nickel-Mangan-Kobalt-Zellen, abgekürzt NMC. NMC 622 sind Kathoden mit

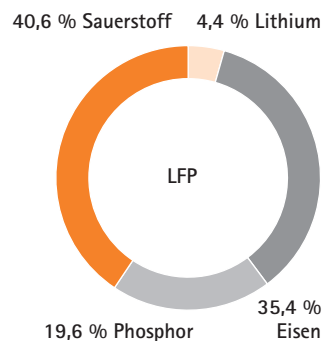
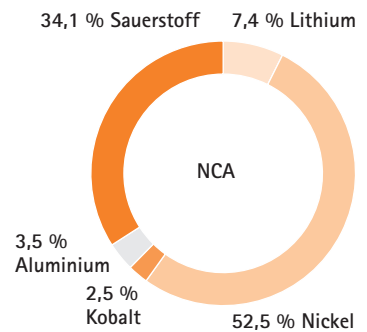
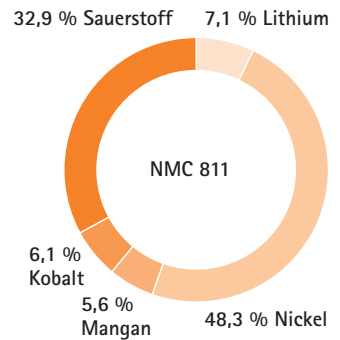
Zusammensetzung Kathoden

6 Teilen Nickel und je 2 Teilen Mangan und Kobalt; heute üblich sind NMC 811-Kathoden, die also nur noch 10 % der ursprünglichen Kobaltmenge enthalten. Daneben hat Tesla auch Aluminium statt Mangan verwendet: Diese NCA-Zellen enthalten nur noch 4 % der ursprünglichen Kobaltmenge, haben aber einen schwierigeren Herstellungsprozess.

Als Kathodenmaterial wird seit etwa 2020 zunehmend Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) verwendet; es ersetzt die NMC-Chemie und kommt ganz ohne Kobalt, Mangan und Nickel aus. LFP-Batterien sind im Vergleich zu NMC-Batterien günstiger, weil die Grundstoffe reichlich vorhanden sind, haben eine längere Lebensdauer, höhere Sicherheit gegen das thermische Durchgehen und damit eine reduzierte Brandgefahr sowie eine geringere Alterung bei einer Aufladung auf 100 %.

Diesen Vorteilen steht eine deutlich geringere Energiedichte (200 statt 250 Wh/kg) und eine höhere Kälteempfindlichkeit gegenüber, die mit einer höheren Packungsdichte der Zellen und einer stärkeren Temperierung bei Kälte abgemildert werden kann.

Aktuell werden häufig die Einstiegsmodelle von E-Autos aus Kostengründen mit LFP-Batterien ausgestattet, während in den Modellen mit hoher Leistungs- und Reichweitenanforderung NMC-Batterien verbaut werden.



1.2. Herstellung von Traktionsbatterien

Die Zellspannung einer Lithium-Zellen beträgt je nach Kathodenzusammensetzung zwischen 3,7 V und 3,2 V (LFP-Zellen). Um die Betriebsspannungen von ca. 400 V zu erreichen, müssen deshalb an die 100 Zellen in Serie geschaltet werden, bei Bordspannungen von 800 V doppelt so viele. Zur Erhöhung der Batteriekapazität werden mehrere dieser Zellstränge parallelgeschaltet, d.h. die Traktionsbatterie besteht aus hunderten einzelner Zellen.

Bisher wurden die Zellen zu Modulen zusammengefasst – mit eigenem Gehäuse und Verkabelung, ferner Sensoren für das Batterie-Management-System (BMS). Je nach Batteriegröße werden in weiterer Folge 8 bis 30 solcher Module zur Traktionsbatterie zusammengebaut – wiederum mit Gehäuse und Verkabelung und dazu Vorrichtungen zur Temperaturkontrolle (Kühlung oder Heizung). Dies alles erhöht das Gewicht, den Rohstoffverbrauch und die Kosten.

Neuerdings wird auf die Modulebene verzichtet und die Zellen direkt in ein großes Batteriepack installiert (Cell-to-Pack-Design). Noch weitergehende Konzepte übertragen den Batteriezellen auch strukturelle Aufgaben der Karosserieaussteifung und reduzieren damit das Karosseriegewicht und den Energieverbrauch beim Fahren. Es ist allerdings noch unklar, wie hier eine Reparatur oder ein Austausch einzelner Zellen möglich bleibt.

Seit Tesla 2015 erstmals langstreckentaugliche Elektrofahrzeuge auf den Markt gebracht hat, sind die Batteriegrößen noch einmal deutlich gestiegen. Kleinwagen werden aktuell mit 40 - 50 kWh Batterien ausgestattet, Mittelklasse-Fahrzeuge mit 50 - 80 kWh, in großen SUV werden heute Batteriekapazitäten bis zu 100 kWh verbaut.

Es bleibt dabei: Die Batterie ist die mit Abstand teuerste Komponente, die Rohstoffe wie Lithium und Aluminium im Fall von NMC-Kathoden auch Nickel, Mangan und Kobalt erfordert. Auf den folgenden Seiten werden die sozialen und ökologischen Herausforderungen bei der Gewinnung und Verarbeitung dieser Rohstoffe zusammengefasst.

Ökologische und soziale Herausforderungen am Rohstoffmarkt für Lithium-Ionen-Akkus

Der Aufbau von ökologisch und sozial verträglichen Lieferketten für die benötigten Rohstoffe ist eine zentrale Aufgabe für die Zukunft. Initiativen für den Ersatz von Kobalt oder zumindest zur nachhaltigen Kobaltbeschaffung, wie jene von BMW und Samsung, haben hier Vorbildwirkung.

Die Politik ist gefordert, sozial und ökologisch gerechte Rahmenbedingungen in der Rohstoffgewinnung zu schaffen und deren Umsetzung durch die Industrie sicherzustellen. Das EU-Lieferkettengesetz liefert dazu verbindliche Handlungsanleitungen. Wirtschaftspolitisch ist es wichtig, dass sich die Materialien der Traktionsbatterien während der Nutzung nicht verbrauchen. Durch verbindliche Wiederverwertungsquoten am Ende der Batteriebensdauer können sie im Kreislauf geführt werden und so die Rohstoffgewinnung und damit Abhängigkeit Europas schrittweise entlasten. Der schwedische Zellhersteller Northvolt zeigt bereits heute, was künftig zum Standard werden sollte: Aus alten Batterien werden im schwedischen Skelleftea die Rohstoffe für neue Zellen gewonnen. Die gesamte Fabrik wird zudem mit Ökostrom aus nahen Wasserkraftwerken versorgt.



Lithium Dreieck:
In Argentinien, Chile und Bolivien befinden sich rund 75% der weltweiten Lithium-Vorkommen. Problematisch ist insbesondere der enorme Wasserverbrauch bei den heutigen Abbaumethoden.



Potenzielle Eigenversorgung mit Rohstoffen aus Österreich:

In Kärnten befindet sich mit 280.000 Tonnen das größte Lithiumoxid-Vorkommen Europas. Damit könnten etwa 28 Millionen Traktionsbatterien hergestellt werden. Durch die steigende Nachfrage wurde auch der Abbau von Grafit in der Steiermark wieder aufgenommen.

China ist der größte Grafitproduzent. Durch mangelnde Sicherheitsvorkehrungen werden beim Abbau und beim Transport große Mengen gesundheitsschädlichen Feinstaubes freigesetzt.

Indonesien, Philippinen, Kanada und Russland sind die größten Nickel Produzenten. Das in der Herstellung freigesetzte Schwefeldioxid ist ein gefährlicher Luftschadstoff und belastet die Umwelt.

65% des weltweiten Kobalts kommen aus dem Kongo. Die politische Lage im Land ist instabil. Umwelt und Gesundheit werden beim Abbau chronisch vernachlässigt.

Südafrika ist der weltweit größte Produzent von Mangan. Die Umwelteffekte im Abbau werden weniger kritisch bewertet.

Australien ist der größte Lieferant von Bauxit. Die Herstellung von Aluminium durch Schmelzfluss-Elektrolyse ist sehr stromintensiv. Der beim Abbau entstehende Rotschlamm gefährdet das Grundwasser.

1.3 Seltene Erden in der Elektromobilität

Unter „Seltene Erden“ werden die 14 Elemente, die sich im Periodensystem zwischen dem Lanthan und dem Lutetium befinden, verstanden. Sie werden auch Lanthanoide genannt, weil sie chemisch sehr ähnlich sind.

Die Seltenen Erden haben herausragende magnetische Eigenschaften und werden deshalb für leistungsfähige Dauermagnete in Elektromotoren für Hybrid-, Brennstoffzellen- und auch batterieelektrische Fahrzeuge verwendet.

Entgegen ihrem Namen sind Seltene Erden gar nicht so selten: Die meisten von ihnen kommen mindestens 1000-mal häufiger vor als Silber. Auch die Rohstofflager sind weltweit verteilt - wie die Meldung über große Funde in Nordschweden zeigt. Aber die Gewinnung der Metalle aus den Erzen ist wegen ihrer großen chemischen Ähnlichkeit aufwändig und es entstehen große Mengen toxischer Abfälle. Daher haben beispielsweise die USA, die in den 1980er Jahren noch führend bei der Produktion waren, die Gewinnung eingestellt, nachdem China sich entschieden hat, Seltene Erden-Erze in großem Stil herzustellen. Dazu verarbeitet China nicht nur Erze aus eigenem Abbau, sondern kauft auch weltweit Erze auf und hat sich so ein de-facto Monopol für Seltene Erden geschaffen.

Um von diesem Monopol unabhängig zu werden, haben zahlreiche Hersteller Elektromotoren entwickelt, die ohne Seltene Erden auskommen. In Batterien finden Seltene Erden keine Anwendung.

1.4 Weiterentwicklung der Traktionsbatterien in naher Zukunft

Die Batterien sind derzeit ein sehr reges Forschungsfeld. Neben der Elektromobilität werden sie bei der Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energiequellen eine zentrale Rolle zur Speicherung spielen. Eine umweltverträgliche und günstige Produktion samt Kreislaufführung der Rohstoffe verbunden mit einem raschen Aufbau zusätzlicher Fertigungskapazität ist dafür unabdingbar. Im Folgenden werden kurz jene Entwicklungen in der Batterieentwicklung beschrieben, die kurz vor der Markteinführung sind und von renommierten Herstellern bereits angekündigt wurden.

1.4.1 Lithium-Ionen-Batterien mit Silizium-Anoden

Silizium kann pro Gewichtseinheit sehr viel mehr Lithium-Ionen aufnehmen als das heute verwendete Grafit; damit kann auf der Anoden-Seite viel Gewicht gespart werden und so die spezifische Energiedichte pro kg Batterie erhöht werden. Herausfordernd ist noch die Tatsache, dass das Volumen der Silizium-Anode bei der Einlagerung der Lithium-Ionen deutlich wächst. Die Zellkonstruktion muss deshalb dieses Wachstum zulassen, ohne dauerhaft Schaden zu nehmen. Alternativ könnte auch ein Gemisch aus Grafit-Silizium für die Anoden zur Anwendung kommen, bei dieser Materialkombination ist die Ausdehnung weniger stark.

1.4.2 Lithium-Feststoff-Batterien

Nicht wiederaufladbare Lithium-Batterien (etwa Knopfzellen für Hörgeräte) haben heute schon eine Anode aus metallischem Lithium – von denen Lithium-Ionen beim Gebrauch in die Kathode wandern. Diese Batterien können aber

nicht einfach wieder aufgeladen werden, denn die Lithium-Ionen lagern sich beim Wiederaufladen auf der Anodenseite nicht schön geordnet ab, sondern bilden eine raue Struktur mit scharfen, langen Spitzen, den Dendriten.

Beim wiederholten Be- und Entladen würden die Dendriten die Membran, die die Anode von der Kathode trennt, zerstören und so einen Kurzschluss verursachen. Um dies zu verhindern, wird an festen Elektrolyten geforscht, die die Funktion der Membran übernehmen und gleichzeitig eine Leitfähigkeit für Li-Ionen aufweisen. Da sich aber Ionen in Festkörpern deutlich langsamer bewegen als in einem flüssigen Elektrolyten, ist die Entwicklung eines solchen Elektrolyten eine große Herausforderung. Meistens werden hier keramische Materialien eingesetzt, weil sie die nötige Stabilität gegen die Dendriten besitzen. Der feste Elektrolyt ist der Namensgeber für die Feststoff-Batterie, und da hier das Lithium in der Anode als Metall und nicht als Ion vorliegt, sind diese Batterien auch streng genommen keine Lithium-Ionen-Batterien mehr.

Der Wegfall des Graphits der Anode erhöht die Energiedichte weiter, daher sind diese Batterien für Fahrzeuganwendungen mit hoher Reichweite und/oder hoher Leistung interessant und auch für Anwendungen, bei denen eine leichte Batterie große Vorteile verspricht - etwa in Elektroflugzeugen.

1.4.3 Natrium-Ionen-Batterien

Alle bisher behandelten Batterien enthalten Lithium-Ionen als Ladungsträger. Lithium ist in der Gewinnung vergleichsweise aufwändig und global gesehen sehr ungleich verteilt. Natrium hingegen ist sehr reichlich vorhanden (z.B. im Kochsalz und im Meerwasser) und leicht zugänglich. Natrium-Ionen können grundsätzlich ähnlich wie Lithium-Ionen als Ladungsträger eingesetzt werden. Bisher hatten allerdings Natrium-Ionen eine wesentlich geringe Energiedichte (unter 100 Wh/kg) und wurden daher als ungeeignet für Elektrofahrzeuge angesehen. Für Stationärspeicher, bei denen die Energiedichte keine so große Rolle spielt, sind sie als Stromspeicher bereits im Einsatz.

Führende Batteriezellen-Produzenten aus Fernost und neuerdings auch Northvolt in Schweden haben diesen Batterietyp in den letzten Jahren allerdings so weiterentwickelt, dass eine Energiedichte von 160 Wh/kg erreicht wurde und schon bald ein erster Kleinwagen mit Na-Ionen-Batterie vorgestellt werden wird. Als Kathode wird dabei eine Verbindung aus Eisen, Stickstoff und Sauerstoff verwendet, die als Preußisch-Blau bekannt ist. Sie wird heute als Farbstoff und auch zu medizinischen Zwecken verwendet, es gibt deshalb bereits bestehende Produktionsanlagen im großtechnischen Maßstab. Auf Nickel und Kobalt kann damit gänzlich verzichtet werden. Als Anode kommt Grafit nicht in Frage, da die größeren Na-Ionen nicht zwischen die Kohlenstoff-Schichten des Grafits passen; als Anoden wird deshalb Hartkohlenstoff eingesetzt, der mikroporös ist und so die Natrium-Ionen aufnehmen kann. Als Elektrolyt kann theoretisch eine wässrige Lösung verwendet werden, die Batterie wäre damit unbrennbar. Für höhere Energiedichten ist allerdings ein organischer Elektrolyt notwendig. Als Stromableiter in der Anode kann anstatt teurer Kupferfolie wie in Li-Ionen Batterien in der Na-Ionen Batterie eine günstige Aluminiumfolie eingesetzt werden.

Insgesamt sind das preiswerte, ökologisch wesentlich unbedenklichere und fast überall verfügbare Rohstoffe. Deshalb sind Na-Ionen-Batterien auch deutlich günstiger als Li-Ionen-Batterien - perspektivisch werden sie weniger als die Hälfte der heute eingesetzten NMC-Zellen kosten. Die vorhandenen Fertigungsanlagen für Li-Ionen-Batterien können zudem relativ leicht auf die Na-Ionen-Technik umrüstet werden, sodass eine schnelle Umstellung der Produktion möglich ist.

Für die Anwendung im Fahrzeug verspricht die Na-Ionen-Technologie noch weitere entscheidende Vorteile: Die Zellen verlieren bei tiefen Temperaturen kaum Kapazität und können auch mit höheren Temperaturen im Sommer gut umgehen, eine Batterieheizung und -kühlung mitsamt der Verringerung der Reichweite der heutigen Elektroautos im Winter könnte also künftig nicht mehr nötig sein. Auch sollen die Na-Ionen-Batterien hohe Ladeleistungen und damit kurze Ladezeiten gut vertragen können.

2. Umwelteffekte im Fahrbetrieb

Nicht nur die Herstellung des Fahrzeuges hat Einfluss auf die Umwelt. Auch beim Fahren entstehen Umwelteffekte, die je nach Antriebsart sehr unterschiedlich sind. Bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren wird Diesel oder Benzin als Treibstoff verbrannt - dadurch entstehen unmittelbar schädliche Abgase wie Stickoxide, Feinstaub und das klimaschädliche Kohlendioxid. Die Förderung, Aufbereitung und der Transport der Treibstoffe verursachen zusätzliche Umweltschäden.

Elektroautos haben keinen Auspuff, Elektromotore verursachen keine Luftschadstoffe. Diese fallen aber je nach Herstellungsart des "getankten" Stroms in unterschiedlicher Höhe am Ort der Stromerzeugung und beim Bau der Stromerzeugungs- und Verteilungsanlagen an.

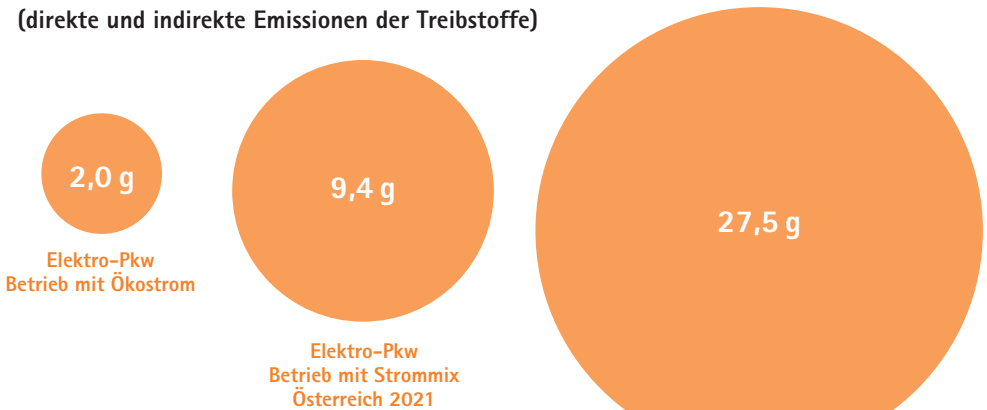
CO₂-Emissionen Fahrbetrieb 100 km (direkte und indirekte Emissionen der Treibstoffe)



Feinstaub aus den Bremsen und Schwermetalle aus dem Gummiabrieb der Reifen fallen unabhängig von der Antriebsart bei jedem Fahrzeug an. Das höhere Gewicht und stärkere Beschleunigungsvermögen der aktuell angebotenen Elektrofahrzeuge verursachen je nach Fahrweise mitunter einen höheren Reifenabrieb.

Vergleicht man die Schadstoffemissionen bei einer Fahrt von 100 km unter Mitberücksichtigung aller vorgelagerten Emissionen der Stromerzeugung und Treibstoffförderung, werden die Nachteile von Verbrennungsmotoren deutlich sichtbar. Sowohl bei gesundheitsschädlichen Stickoxiden und Feinstaub als auch beim Treibhausgas CO₂, haben Verbrennungsmotoren eine wesentlich schlechtere Umweltbilanz. Bei den Emissionen der Elektroautos ist die zusätzliche Umweltentlastungsmöglichkeit durch die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen gut erkennbar.

NOx-Emissionen Fahrbetrieb (direkte und indirekte Emissionen der Treibstoffe)



Berechnungsbasis: Pkw der Kompaktklasse
Durchschnittsverbrauch 7,7 l Benzin bzw. 17 kWh Strom pro 100 km
Umweltbundesamt 2021, 2023

Feinstaub-Emissionen Fahrbetrieb (direkte und indirekte Emissionen der Treibstoffe)



Berechnungsbasis: Pkw der Kompaktklasse

Durchschnittsverbrauch 7,7 l Benzin bzw. 17 kWh Strom pro 100 km

Umweltbundesamt 2021, 2023

Ein wichtiger Grund für die niedrigeren Umwelteffekte von Elektroautos ist der niedrigere Energieverbrauch. Da Elektromotoren viel effizienter als Verbrennungsmotoren sind und beim Bremsen Energie zurückgewinnen, die in der Batterie gespeichert werden kann, benötigen Elektrofahrzeuge nur rund ein Drittel der Energie von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

Neben den Schadstoffemissionen von Verbrennungsmotoren verursacht auch die Förderung der fossilen Treibstoffe ökologische und gesellschaftliche Probleme. Auch diese gilt es, bei der Diskussion rund um unsere Versorgung mit kritischen Rohstoffen mitzudenken.

Die Ausbeutung der noch vorhandenen und neu erschlossenen Ölfelder ist nicht nur ökologisch riskant, sondern auch energetisch immer aufwändiger: Tiefsee-Bohrungen, Fracking und die Aufbereitung der Ölsande aus Kanada werden die THG-Emissionen der Verbrennungsmotoren zusätzlich verschlechtern.

2.1 Umwelteffekte in der Ölförderung



Die Gewinnung von Erdöl aus Teersanden in Alberta (Canada) ist extrem energieintensiv, führt zur Zerstörung der Wälder und hinterlässt Giftstoffe, die Menschen und Tiere in der Region gefährden.



Beim Fracking werden Chemikalien in den Boden gepumpt, um schwer erreichbares Erdöl und Gas zugänglich zu machen. Es kommt dadurch zu gefährlichen und langfristigen Grundwasserverseuchungen.



Bei Tiefseebohrungen kommt es immer wieder zu großen Ölunfällen. Bei der Havarie auf Deepwater Horizon 2010 gelangte rund 1 Million Tonnen Erdöl in den Golf von Mexico. Schwere Schäden am marinen Ökosystem waren die Folge.



Durch steigende Ölpreise wird es rentabel, auch bisher teuer zu erschließende Ölfelder zu nutzen. Der Yasuni Nationalpark in Ecuador gilt als artenreichster Ort der Welt. Infolge massiver ökologischer Bedenken hat die Bevölkerung von Ecuador in einer richtungsweisenden Entscheidung mit deutlicher Mehrheit im Sommer 2023 für die Einstellung der Ölförderung im Park gestimmt.



In Westsibirien verursacht die russische Ölförderung die großflächigste Ölkatastrophe der Welt. Rund 15 Millionen Tonnen auslaufendes Öl im Jahr verseuchen Flüsse und Böden. Lebensräume von Mensch und Tier werden zerstört.

Die politische Instabilität im Mittleren Osten hängt eng mit strategischen Interessen an Ölressourcen zusammen. Im ersten Golfkrieg verbrannten über Monate hinweg täglich 420.000 Tonnen Öl. Die brennenden Ölquellen in Kuwait gelten bis heute als das größte Luftverschmutzungsereignis in der Geschichte der Menschheit.

Saudi Arabien hat die zweitgrößten Ölreserven der Welt. Menschenrechtsverletzungen und Kriegsverbrechen werden zugunsten einer stabilen Ölversorgung ignoriert.

Im anhaltenden Bürgerkrieg in der Grenzregion zwischen Nord- und Südsudan wird um die Kontrolle von Regionen mit Ölvorkommen gekämpft.

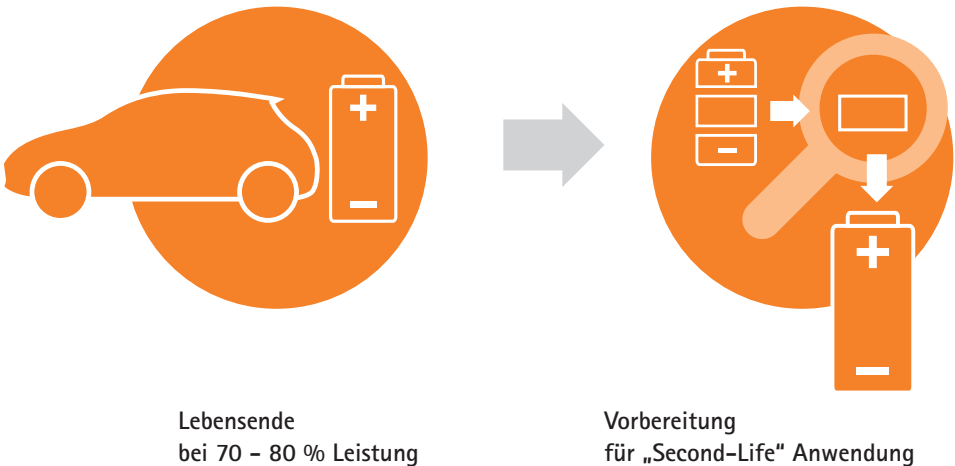
Im Nigerdelta führen Korruption, veraltete Infrastruktur und Anschläge zu anhaltender Verschmutzung durch austretendes Öl mit riesigen Schäden für Mensch und Natur.

3. Nachnutzung der Traktionsbatterie

Ähnlich wie bei Mobiltelefonen altern auch die Batterien von Elektrofahrzeugen. Aufgrund der speziellen Zellchemie sowie einem ausgeklügelten Batteriemangement werden aber wesentlich längere Lebensdauern erreicht. Wenn die Zellen nur noch 70 - 80 % ihrer ursprünglichen Kapazität haben, sind sie für den Einsatz im Fahrzeug oft nicht mehr geeignet, weil sich die Reichweite entsprechend reduziert.

Fahrzeughersteller geben derzeit Garantien von rund 8 Jahren auf die verbauten Traktionsbatterien. Eine Nutzungsdauer der Batterie über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs wird mittlerweile als realistisch angesehen.

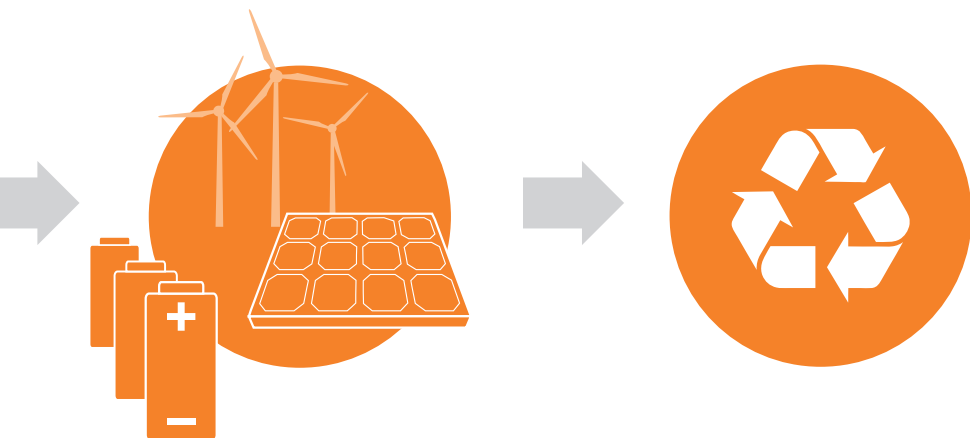
Eine sinnvolle Möglichkeit, die Zellen der Traktionsbatterie am Ende der Fahrzeuglebensdauer weiter zu verwenden, sind sogenannte „Second-Life“ Anwendungen.



Quelle: Schaufenster Elektromobilität 2016

Bei “Second-Life” Anwendungen werden Traktionsbatterien am Ende der Lebensdauer des Fahrzeugs nicht entsorgt, sondern für neue Anwendungen genutzt. Auch wenn die Zellen nicht mehr stark genug für die Nutzung im Fahrzeug sind, können sie z.B. als Hausspeicher eingesetzt werden. Die Lebensdauer einer Batterie kann so um weitere 10 - 20 Jahre verlängert werden. Das schont nicht nur die Umwelt, sondern spart auch Kosten.

Bereits heute bieten Fahrzeughersteller wie Audi, BMW, Hyundai, Mercedes, Nissan, Renault oder Volkswagen derartige Lösungen an.



Second-Life als

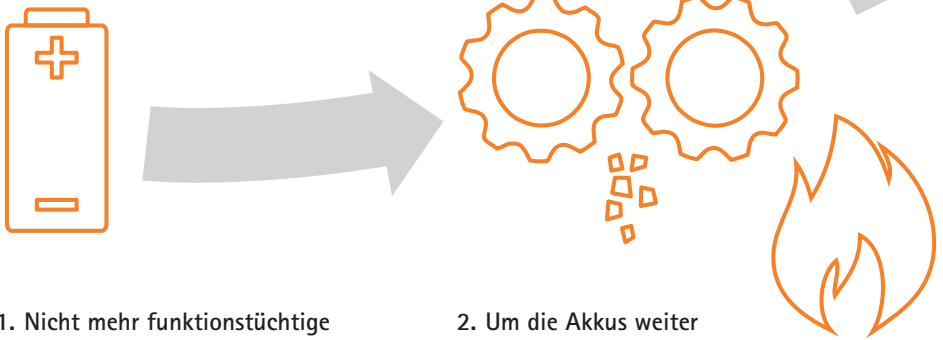
- Hausspeicher
- Beitrag zur Netzstabilität
- Spitzenlastmanagement
- Notstromversorgung
- Puffer für Schnellladesysteme

Recycling

bei Leistungsabfall
unter 40 %

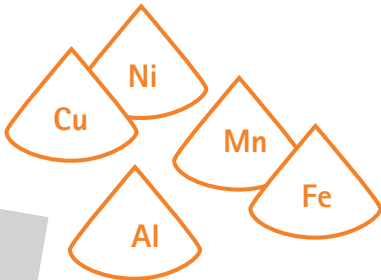
4. Entsorgung - Recycling

Nach einem Leistungsabfall auf unter 40% genügt die Kapazität auch nicht mehr für eine "Second-Life" Anwendung. Die Batterien müssen entsorgt werden. Bisher fallen alte Traktionsbatterien nur sehr vereinzelt an. Mit zunehmender Verbreitung von Elektrofahrzeugen wird sich das allerdings ändern. Bereits heute sind Akkus aus E-Bikes, Handys, Laptops und Elektrogeräten ein Recyclingthema. Laut aktuell gültiger EU-Verordnung müssen derzeit mindestens 50 % der Inhaltsstoffe von Lithium-Ionen-Akkus recycelt werden. Technisch ist die stoffliche Wiederverwertung von über 90 % der Materialien möglich. Da es in Österreich keine Recyclinganlage gibt, werden hierzulande anfallende Akkus größtenteils in Deutschland oder der Schweiz verarbeitet.



1. Nicht mehr funktionstüchtige Traktionsbatterien werden an ein Entsorgungsunternehmen übergeben. Wegen der hohen Energiedichte von Lithium-Ionen Batterien gibt es strenge Sicherheitsauflagen für den Transport.

2. Um die Akkus weiter behandeln zu können, werden diese vollständig entladen. Aufgrund der bisher mangelnden Standardisierung müssen sie oft noch händisch zerlegt werden.



4. Metallische Komponenten wie Kupfer, Nickel, Mangan, Aluminium und Eisen sowie Kunststoffe können als Sekundärrohstoffe rückgewonnen werden. Lithium und Kobalt werden bisher nicht herausgelöst, sondern fallen als Verbundstoffe an.

3. Nach der Zerkleinerung werden die Zellen in mehreren Schritten thermisch behandelt. Derzeit werden zwischen 60 – 70 % der Inhaltsstoffe wiederverwertet. Die Abluft wird gefiltert – der zurückgebliebene Filterkuchen wird deponiert. Als fester Rückstand fällt ungefährliche, glasartige Schlacke an.

Lithium Recycling in Zukunft:

Das industrielle Recycling von Lithium ist derzeit wirtschaftlich noch nicht rentabel, aber technisch möglich. Mit steigenden Lithium-Preisen wird sich dies in Zukunft allerdings ändern. Erfolgreiche Pilotprojekte zur Wiedergewinnung von Lithium zeigen bereits heute die technischen Möglichkeiten auf.

5. Umwelteffekte – gesamte Lebensdauer

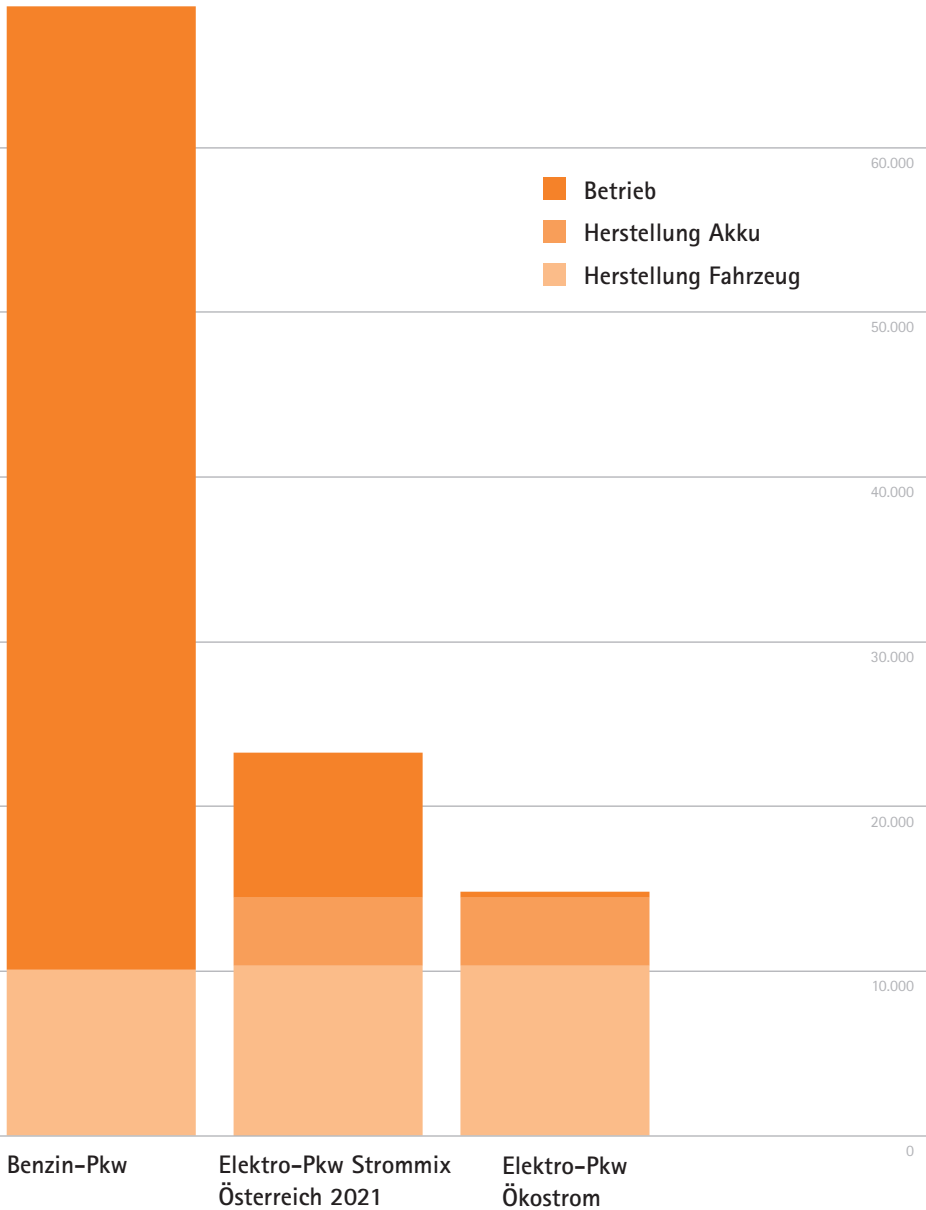
Betrachtet man den Ausstoß von Treibhausgasen durch Herstellung und Fahrbetrieb über die gesamte Lebensdauer der Fahrzeuge, werden die hohen Umwelteffekte von Verbrennungsmotoren deutlich. Die Studie des österreichischen Umweltbundesamtes zeigt die Emissionen der Kompaktklasse (z.B. VW Golf) in der Gesamtbilanz pro km. Die Berechnungen gehen von einer Gesamtfahrleistung von 225.000 km über die Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren aus.

Beim Pkw mit Verbrennungsmotoren entsteht der überwiegende Teil der Treibhausgas-Emissionen im Fahrbetrieb. Die Treibhausgas-Emissionen der Ölförderung, des Öl- und Treibstofftransports und der Raffinerie sind über die Fahrzeuglebensdauer fast so hoch wie die Emissionen der Fahrzeug-Herstellung.

Die Plug-in Hybridfahrzeuge zeigen gegenüber den reinen Verbrennungsfahrzeugen leider in der Praxis nur eine geringe Reduktion der Treibhausgas-Emissionen in der Gesamtbilanz.

Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen ist selbst unter Zugrundelegung des heutigen österreichischen Strommix eine Reduktion auf etwa die Hälfte der Treibhausgas-Emissionen zu erwarten. Da Österreich auf gutem Weg ist, ab 2030 nur noch Strom aus sich erneuernden Energiequellen zu verwenden, ist die dritte Säule der Grafik die maßgebliche: Bei der Verwendung von Strom aus sich erneuernden Energiequellen werden die Emissionen auf etwa ein Viertel der Treibhausgas-Emissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor reduziert. Batterieelektrische Fahrzeuge sind deshalb eine zentrale Säule der Klimaneutralität.

Durch Fortschritte in der Batterieproduktion werden die Vorteile des batterieelektrischen Fahrzeugs gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor künftig noch deutlicher ausfallen.



CO₂-Emissionen über die gesamte Lebensdauer

Berechnungsbasis: Pkw der Kompaktklasse, Lebensdauer 15 Jahre, Jahresfahrleistung 15.000km

Durchschnittsverbrauch 7,7 l Benzin bzw. 17 kWh Strom pro 100 km

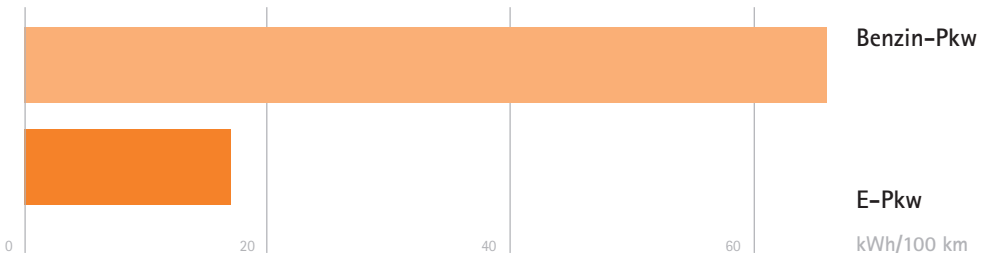
Quelle: Umweltbundesamt 2021, 2023

Was wäre, wenn...

1. Herausforderungen für die Elektrifizierung

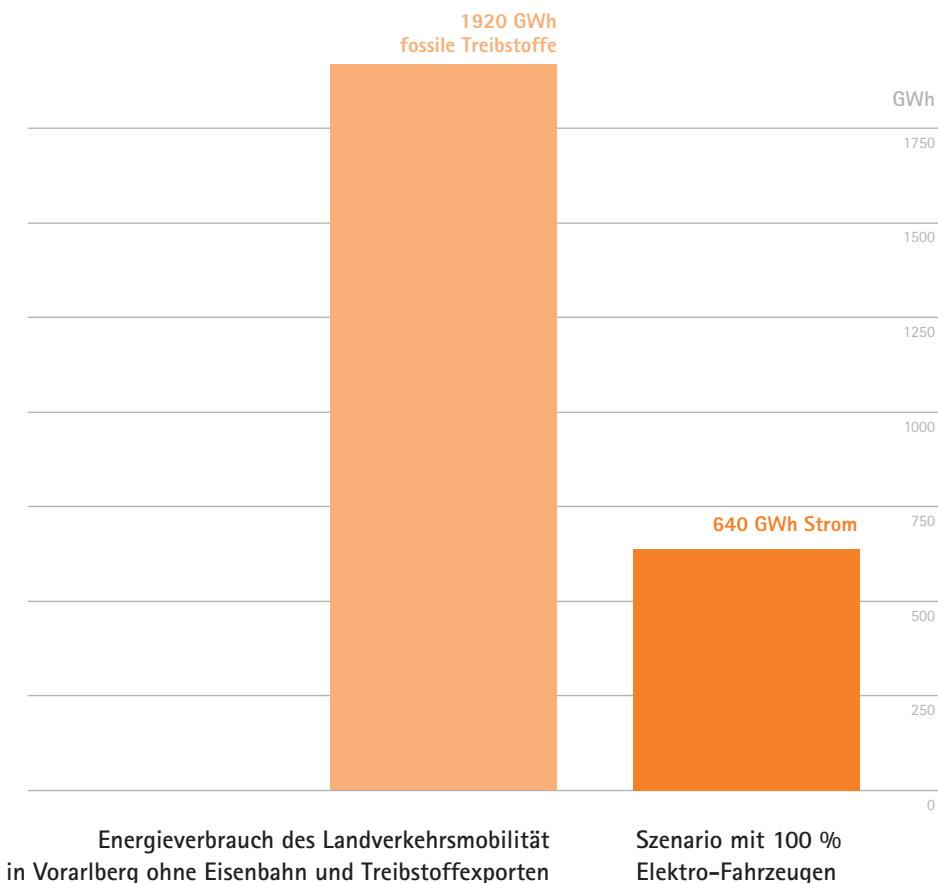
Die Vorteile von Elektrofahrzeugen liegen auf der Hand: Sie sind wesentlich umweltfreundlicher und die Abhängigkeit von Öl aus Konfliktregionen wird deutlich reduziert. Auch das viel diskutierte Thema der Reichweite wird sich auflösen: Die aktuelle Generation von Elektroautos hat Reichweiten um die 400 km. Gleichzeitig ist die Ladeinfrastruktur - mit europaweit nutzbaren Ladekarten - mittlerweile leistungsstark und entlang der Hauptrouten verfügbar. An der Verdichtung des Lade-Netzes wird laufend gearbeitet.

Aufgrund der höheren Effizienz von Elektroautos geht der Gesamtenergiebedarf beim Ersatz von fossil betriebenen Fahrzeugen und gleicher Fahrleistung deutlich zurück. Das Umweltbundesamt geht von Verbrauchswerte von durchschnittlich 17 kWh/100 km aus. Das entspricht in etwa dem Energieinhalt von 1,9 Litern Benzin auf 100 Kilometer. Um 15.000 km pro Jahr elektrisch fahren zu können, genügt die Stromerzeugung einer 12 m² großen Photovoltaikanlage, das ist ungefähr der Grundfläche eines Pkw.



Datenquelle: Umweltbundesamt 2021

Würden alle Pkw, Lkw und Busse in Vorarlberg elektrisch betrieben, würden wir uns ungefähr 190.000.000 Liter Diesel- und Benzin-Importe pro Jahr sparen. Um diese Fahrleistung batterieelektrisch abdecken zu können, würde der Stromverbrauch um rund 640 GWh steigen. Der Gesamtenergiebedarf im Mobilitätsbereich würde gleichzeitig um 67 % auf nur mehr 33 % der heute benötigten Menge zurückgehen.



2. Mögliche Maßnahmen

Um den Strombedarf für den weitgehenden Umstieg auf Elektromobilität bis 2050 abzudecken, bieten sich Maßnahmen in folgenden Handlungsfeldern an:

Aktivverkehr auf kurzen Wegen

Vermeiden, verlagern und umweltverträglich abwickeln sind die Grundsätze der Vorarlberger Verkehrspolitik. Dies trifft auch auf die Elektromobilität zu. Wo immer es gelingt, motorisierten Verkehr zu vermeiden, wird der erforderliche zusätzliche Stromverbrauch von 640 GWh reduziert.

Die aktuelle Verkehrsverhaltensbefragung des Landes Vorarlberg (2023) zeigt, dass 61 % der heutigen Pkw-Wege unter 10 km sind und 38 % der Pkw-Wege sogar kürzer als 5 km sind. Diese Distanzen sind in vielen Fällen mit dem Fahrrad, die ganz kurzen Distanzen oft sogar zu Fuß zu bewältigen.

Elektrobusse und Bahn statt E-Pkw

Elektrisch betriebene, öffentliche Verkehrsmittel sind noch einmal wesentlich effizienter als E-Pkw. Der Bahnverkehr in Vorarlberg glänzt dabei durch die höchste Effizienz. Durch die rasche Umstellung des Busverkehrs in Vorarlberg auf E-Busse wird das Busfahren noch einmal deutlich klimaschonender.

Ausbau der Stromerzeugung aus sich erneuernden Energiequellen

Die FH Vorarlberg und das Energieinstitut bewerten in Vorarlberg allein im Bereich Photovoltaik auf bestehenden Gebäuden ein Ausbaupotenzial von rund 2.000 GWh. Auch bei Wasserkraft und Windenergie existieren erhebliche Potenziale.

3. Schlussfolgerungen

- Über die gesamte Lebensdauer gerechnet, sind Elektrofahrzeuge umweltverträglicher als Diesel-, Benzin- oder Erdgasfahrzeuge. Die Herstellung von Elektrofahrzeugen verursacht zwar knapp 50% höhere Treibhausemissionen, im Betrieb sind sie dafür deutlich energiesparender. Besonders groß wird der ökologische Vorteil, wenn die Fahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben werden. Bereits nach 20.000 km sind in diesem Fall die höheren Emissionen der Fahrzeug- und Akkuherstellung ausgeglichen. Der Strombedarf eines E-Pkw kann schon mit einer kleinen PV-Anlage mit rund 12 m² Fläche gedeckt werden.

Mehrere Hersteller haben zudem angekündigt, bei der Herstellung ihrer Elektrofahrzeuge, vor allem auch der Batterien, künftig nur noch Strom aus sich erneuernden Energiequellen einzusetzen. So lässt sich der CO₂-Rucksack der Elektrofahrzeug-Herstellung minimieren und die Klimabilanz fällt noch deutlicher zugunsten der Elektrofahrzeuge aus.

- Die Förderung von Erdöl und Erdgas für unsere derzeitige Mobilität hat weltweit enorme Umweltauswirkungen. Bei der Gewinnung, Verarbeitung und Verbrennung in den Fahrzeugen entstehen neben Klimagasen zahlreiche Luftschadstoffe. Die fossilen Treibstoffe sind außerdem nach dem Verbrennen unwiderruflich verloren. Die entstehenden Abgase werden in großen Mengen in der Atmosphäre deponiert. Das führt zu gesundheitlichen Problemen und befeuert den Klimawandel. Trockenheit, Temperaturerhöhung und extreme Wetterereignisse sind auch bei uns deutliche Zeichen einer Veränderung der Lebensbedingungen. Mittelfristig könnten viele Lebensräume für Menschen unbewohnbar werden, enorme soziale Spannungen wären die Folge.

- Für die Elektromobilität sind Rohstoffe wie Lithium, Kupfer und Aluminium erforderlich. Sie sind aufwändig zu fördern und werden bisweilen unter fragwürdigen sozialen Bedingungen gewonnen. Allerdings werden allein aus Kostengründen derzeit große Anstrengungen unternommen, den Einsatz kritischer Rohstoffe zu verringern oder ganz zu vermeiden, wie das bereits mit LFP-Batterie, Natrium-Ionen Batterien oder Elektromotoren ohne Seltene Erden gelingt. Trotzdem müssen weitere Anstrengungen unternommen werden, die Gewinnung und Verarbeitung sozial- und umweltverträglicher zu gestalten. Schließlich kommt dem Gesetzgeber eine wichtige Rolle zu, höhere Wiederverwertungsquoten für Fahrzeug-Akkus festzuschreiben und so sicherzustellen, dass die Rohstoffe in den Kreislauf geführt werden. Im Unterschied zu fossilen Treibstoffen werden die Rohstoffe der Elektromobilität während der Nutzung nicht verbraucht; sie können am Ende der Nutzung wiedergewonnen werden. Aktuell sind bereits einige Recyclinganlagen in Betrieb, zusätzliche Recycling-Kapazitäten sind in Planung und Bau.
- Ein vollständiger Umstieg auf Elektromobilität stellt uns vor Herausforderungen in der Stromaufbringung und Netzinfrastruktur. Damit wir unsere Unabhängigkeit von Ölimporten nicht durch vermehrte Stromimporte erkaufen, müssen wir insgesamt Energie einsparen. Pkw-Fahrten vermeiden, alle Einsparmöglichkeiten von Strom nützen und die Gewinnung von heimischem Ökostrom verantwortungsvoll ausbauen. Das reduziert die Auslandsabhängigkeit, erhöht die heimische Wertschöpfung und ist volkswirtschaftlich sinnvoll. Zur Schonung der Netzinfrastruktur und zur Vermeidung unnötig teurer, zeit- und ressourcenintensiver Netzausbauten sind zudem beim Laden mehrerer Fahrzeuge Lastmanagementsysteme vorzusehen.

- Elektrofahrzeuge sind zusammenfassend ein wesentlicher Teil einer zukunftsfähigen Mobilität. Aber ohne die Reduktion der Pkw-Anzahl durch gemeinsame Fahrzeugnutzung, Reduktion der Pkw-Fahrten, mehr zu Fuß gehen und Rad fahren sowie den Umstieg auf gemeinsam genutzte Elektrofahrzeuge wie die Bahn und elektrische Busse ist eine für alle Menschen verträgliche Lebensweise auf unserem Planeten nicht möglich.

Quellen

- Amt der Vorarlberger Landesregierung. (2024). Mobilitätserhebung Vorarlberg 2024. Wien.
- Amt der Vorarlberger Landesregierung. (2019). Mobilitätskonzept Vorarlberg 2019. Bregenz
- Amt der Vorarlberger Landesregierung. (2017). Energie- und Monitoringbericht Vorarlberg. Bregenz
- Amt der Vorarlberger Landesregierung. (2015). Elektromobilitätsstrategie Vorarlberg 2015-2020. Bregenz.
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367–71.
- Rahimzei, Ehsan, Regett, Anika, Fischhaber, S. (2016). Maßnahmenpapier zur Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen.
- Ramoni, M. O., & Zhang, H. C. (2013). End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(6), 881–891.
- THOMAS, M., L.A.-W. ELLINGSEN, C.R. HUNG und A.H. STROMANN, 2018. Research for TRAN, Committee-Battery-powered electric vehicles: market development and life cycle emissions [online] [Zugriff am: 20. Februar 2023]. Verfügbar unter: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL_STU\(2018\)617457_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL_STU(2018)617457_EN.pdf)
- Umweltbundesamt. (2010). Elektromobilität in Österreich - Szenario 2020 und 2050. Wien.
- Umweltbundesamt (2021). Die Ökobilanz von Personenkraftwagen: Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO₂-Reduktionspotenzial und Energieeinsparung. Wien.
- Umweltbundesamt (2023). Batterien für E-Fahrzeuge: Nachnutzung und Recycling. Wien.
- Umweltbundesamt (2023). Harmonisierte österreichische direkte und indirekte Treibhausgas-Emissionsfaktoren für relevante Energieträger und Technologien. Wien.
- Umweltbundesamt (2023). Klimaschutzbericht 2023. Wien.
- Umweltbundesamt (2023). Rohstoffe für Elektromobilität – Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und möglicher künftiger Rohstoffabhängigkeiten von Elektrofahrzeugen. Wien.
- Umweltbundesamt (2023). Treibhausgasinventur 2023. Wien.
- Olivetti, E.A. et al., 2017. Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations : Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. *Joule*, 1(2), pp.229–243.
- Battery University, 2019. BU-1003: Electric Vehicles (EV). https://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev
- Dunn, J.B.; Gaines, L.; Barnes, M.; Sullivan, J.; Wang, M., 2012. Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle. Argonne National Laboratory, Argonne.

IMPRESSUM

Herausgeber und Verleger

Amt der Vorarlberger Landesregierung
Abteilung VIa – Allgemeine Wirtschaftsangelegenheiten
Römerstraße 15, 6901 Bregenz
www.vorarlberg.at/energie

Redaktion und Recherche

Kairos – Institut für Wirkungsforschung und Entwicklung
www.kairos.or.at

Fotos

kairos

Gestaltung

Christian Reinhard

Mai 2024



Amt der Vorarlberger Landesregierung
Abteilung VIa – Allgemeine Wirtschaftsangelegenheiten
Römerstraße 15, 6901 Bregenz
www.vorarlberg.at/energie