

# Nachhaltigkeit und Zukunft von Elektroauto- Batterien



 **verti**

Genau Deine Versicherung

# Inhalt

Die Energiewende, die Mobilitätswende, die Elektromobilität und die Batterie	03
Überblick über Themen und Ziele dieses Leitfadens	04
Grundlagen der Batterietechnik	05
Die Wertschöpfungskette der Batterie	09
Nachhaltigkeit von Batterien	12
Batterien am Lebensdauerende: Recycling und Zweitnutzung	20
Batterien im Spannungsfeld zwischen Modularität und Vollintegration	23
Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen	24
Was bringt die Zukunft für die Batterietechnik?	25
Fazit	26

# Die Energiewende, die Mobilitätswende, die Elektromobilität und die Batterie

Die globale Erwärmung stellt die Menschheit vor große Herausforderungen. Zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs sind daher umfangreiche gesellschaftliche und technische Anpassungen erforderlich. Eine wichtige Aufgabe kommt dabei der Reduktion des Treibhausgasausstoßes zu, zu dem die Energiewende wiederum einen wichtigen Beitrag liefert. Die Energiewende zielt darauf ab, fossile Brennstoffe durch erneuerbare Energiequellen aus Wind und Sonne zu ersetzen und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Transformation ist die Mobilitätswende, die eine Umstellung auf nachhaltige und umweltfreundliche Verkehrssysteme beinhaltet. Elektrofahrzeuge spielen dabei eine zentrale Rolle: Einerseits verursachen sie keine lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen, reduzieren die Luftverschmutzung und sorgen für weniger Lärmbelastung, andererseits sind sie auch ein wichtiges Werkzeug, um globale CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Sie sind ein entscheidender Faktor für die Mobilitätswende und Teil des erneuerbaren Energiesystems. Elektrofahrzeuge können Strom aus erneuerbaren Quellen wie Solar- und Windenergie direkt nutzen, was die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen weiter verringert.

Für die Elektrofahrzeuge sind wiederum Batterien von großer Bedeutung. Sie dienen als Speichertechnologie für erneuerbare Energien und ermöglichen die Speicherung und Nutzung von elektrischem Strom in Elektrofahrzeugen. Fortschritte in der Batterietechnologie, insbesondere bei den Lithium-Ionen-Batterien, sind ein elementarer Faktor für die Durchsetzung der Elektromobilität. Synergien zwischen der Energie- und Mobilitätswende zeigen sich in Technologien wie Vehicle-to-Grid (V2G), bei denen Elektrofahrzeuge zudem als mobile Energiespeicher und zur Netzstabilisierung eingesetzt werden. Herausforderungen wie Batterierecycling, Rohstoffverfügbarkeit und Ladeinfrastruktur erfordern weiterhin Fortschritte in Forschung und Entwicklung. Politische Maßnahmen und Anreize sind entscheidend, um die Energiewende und Elektromobilität zu fördern. Zukünftig sind internationale Kooperationen und Standardisierungen notwendig, um eine vernetzte und nachhaltige Energie- und Mobilitätsinfrastruktur zu schaffen. Die Entwicklung der Batterietechnologie wird hierbei eine zentrale Rolle spielen.

# Überblick über Themen und Ziele dieses Leitfadens

Dieser Leitfaden soll einen Überblick über das Thema Nachhaltigkeit von Batterien in Elektrofahrzeugen verschaffen. Dazu gehören ein grundlegendes Verständnis zur Funktionsweise und Alterung von Batterien sowie ein Überblick über Materialien und Produktionsprozesse. Im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung soll dieser Leitfaden einen Überblick über die angewendeten Methoden zur Lebenszyklusbetrachtung schaffen und für den Einfluss der Annahmen in unterschiedlichen Szenarien auf das Bewertungsergebnis schaffen. Ziel ist hierbei, eine klare Darstellung der Zusammenhänge zwischen Energiewende, Elektromobilität und Entwicklungen und Potenzialen im Bereich der Batterien. Zudem bietet dieser Leitfaden einen Überblick rund um die Themen Batterierecycling und Zweitnutzungskonzepte und wagt einen Ausblick auf die Zukunft nachhaltigerer Batterien aus technischer und politischer Sicht.

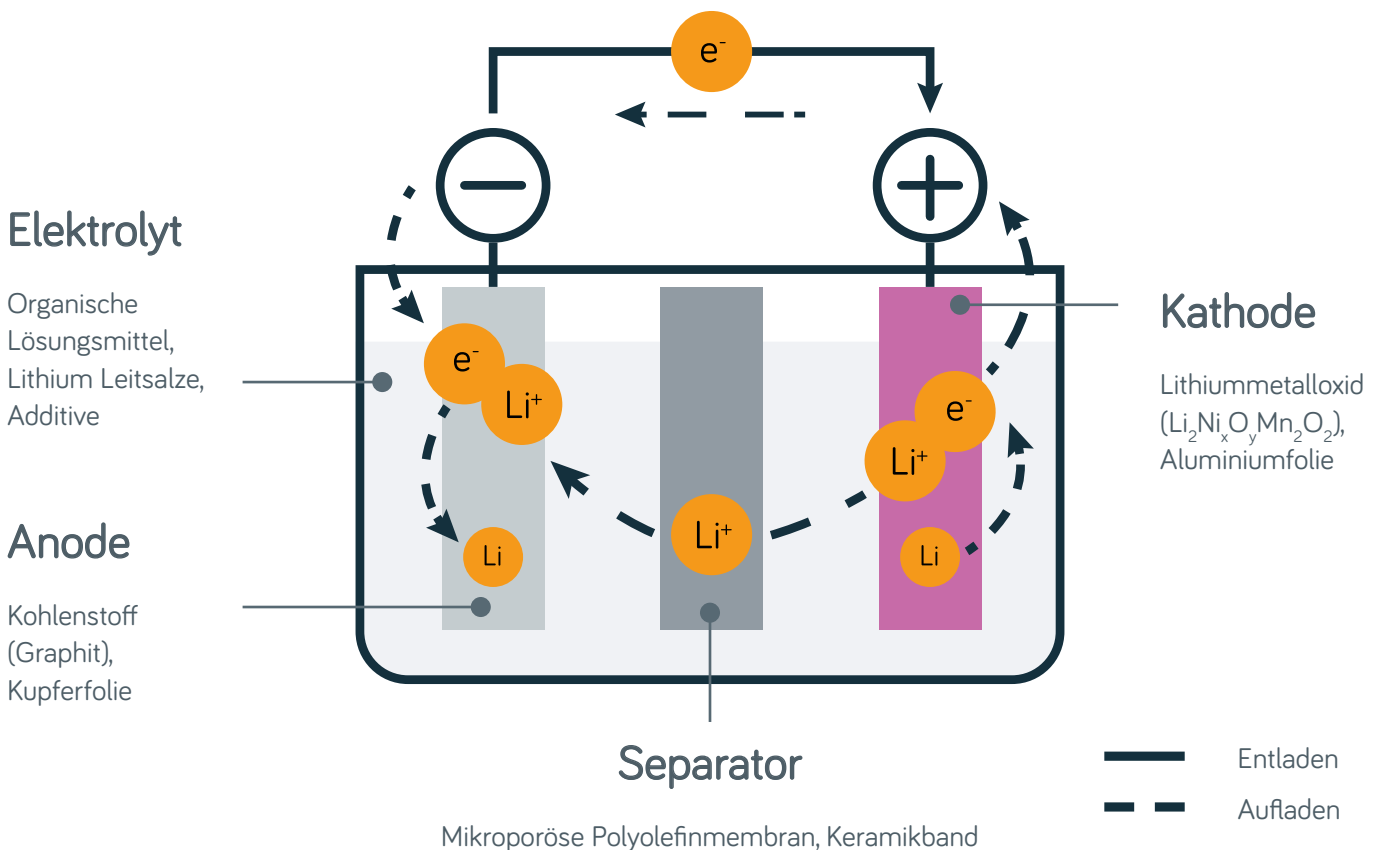


# Grundlagen der Batterietechnik

## Wie funktioniert eine Batterie?

Eine Batterie funktioniert durch die Umwandlung zwischen chemischer Energie und elektrischer Energie. Sie besteht aus drei Hauptkomponenten: der Anode (negativer Pol), der Kathode (positiver Pol) und dem Elektrolyten, der die beiden Pole trennt und den Fluss von Ionen ermöglicht. Wenn die Batterie in Gebrauch ist, findet an der Anode eine chemische Reaktion statt, bei der Elektronen freigesetzt werden. Diese Elektronen wandern durch den externen Stromkreis zur Kathode, wo sie eine zweite chemische Reaktion ermöglichen. Währenddessen wandern positiv geladene Ionen durch Elektrolyten von der Anode zur Kathode, um die Ladungsbilanz aufrechtzuerhalten.

## So funktioniert eine Elektroauto-Batterie




## 06 | Kapitelübersicht

In einer Lithium-Ionen-Batterie, die häufig in Elektrofahrzeugen und mobilen Geräten verwendet wird, besteht die Anode meist aus Graphit und die Kathode aus einem Lithium-Metalloxid. Der Elektrolyt ist eine Lithiumsalzlösung. Beim Entladen der Batterie wandern Lithium-Ionen von der Anode zur Kathode durch den Elektrolyten, während Elektronen durch den externen Stromkreis fließen und dabei elektrische Energie liefern. Beim Laden der Batterie wird der Prozess umgekehrt: Elektronen werden von der Kathode zur Anode geleitet, während Lithium-Ionen in die entgegengesetzte Richtung durch den Elektrolyten wandern. Dadurch wird die chemische Energie wiederhergestellt, die bei der nächsten Entladung in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Dieser wiederholbare und im Fall von Lithium-Ionen-Batterien mit geringen Verlusten behaftete Prozess des Ladens und Entladens macht Batterien zu einer effizienten und wiederverwendbaren Energiequelle. Die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer einer Batterie hängen von den Materialien der Elektroden und des Elektrolyten sowie von der Effizienz der chemischen Reaktionen ab.


### Batterie ist nicht gleich Batterie: Technologien und Materialien

Batterien sind in verschiedenen Technologien und Materialien erhältlich, die ihre Leistungsfähigkeit, Lebensdauer und Anwendungsmöglichkeiten bestimmen. Zu den bekanntesten Batterietypen gehören Lithium-Ionen-Batterien, Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH), Blei-Säure-Batterien und Festkörperbatterien.



**Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH)** kamen in der Vergangenheit in Hybridfahrzeugen und elektronischen Geräten zum Einsatz. Sie sind robust, relativ kostengünstig und haben eine moderate Energiedichte. Im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien sind sie weniger anfällig für Überhitzung, haben aber eine geringere Energiedichte und kürzere Lebensdauer. In den meisten Anwendungsfeldern wurden NiMH-Batterien bereits durch Lithium-Ionen-Batterien ersetzt.

**Blei-Säure-Batterien** sind die älteste Art der wiederaufladbaren Batterien und werden hauptsächlich in Fahrzeugen für Start-, Beleuchtungs- und Zündsysteme verwendet. Sie sind kostengünstig und zuverlässig, jedoch schwer und haben eine niedrige Energiedichte. Durch ein effektives Pfandsystem hält sich die Umweltbelastung trotz des beinhalteten Bleis in Grenzen. Die begrenzte Lebensdauer ist jedoch ein Nachteil.



**Lithium-Ionen-Batterien** sind heute weit verbreitet und werden in Mobiltelefonen, Laptops und Elektrofahrzeugen verwendet. Sie bieten eine hohe Energiedichte, hohe Leistungen, lange Lebensdauer und leichtes Gewicht. Die Lithium-Ionen-Batterie ist dabei ein Oberbegriff für eine Vielzahl möglicher Materialien und Materialkombinationen, welche der Batterie für den vorgesehenen Anwendungsfall besonders vorteilhafte Eigenschaften verleihen können. NMC-Batterien (Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid) bestehen aus einer Kathode mit Nickel, Mangan und Kobalt. Sie bieten eine hohe Energiedichte und gute Leistung, was sie ideal für Elektrofahrzeuge macht. LFP-Batterien (Lithium-Eisen-Phosphat) verwenden Eisenphosphat für die Kathode, sind thermisch stabiler, sicherer und häufig günstiger, aber haben eine geringere Energiedichte. Sie eignen sich gut für Anwendungen, bei denen Sicherheit wichtiger ist. LTO-Batterien (Lithium-Titanat) ersetzen das Graphit in der Anode durch Lithium-Titanat, was eine extrem schnelle Ladezeit und lange Lebensdauer ermöglicht, jedoch bei niedrigerer Energiedichte. Sie sind ideal für Anwendungen, die eine große Anzahl an schnellen Ladezyklen erfordern.

## 07 | Kapitelübersicht

**Festkörperbatterien** sind eine weitere aufstrebende Technologie im Rahmen der Lithium-Ionen-Batterien mit großem Potenzial. Sie verwenden einen festen Elektrolyten anstelle eines flüssigen, was sie sicherer und effizienter macht. Diese Batterien versprechen noch höhere Energiedichten, eine längere Lebensdauer und höhere Sicherheit, sind aber derzeit noch in der Entwicklungsphase.

Zusätzlich gibt es weitere spezialisierte Batterietypen wie Natrium-Ionen-Batterien, die als kostengünstige und umweltfreundliche Alternativen zu Lithium-Ionen-Batterien untersucht werden. Die Wahl der richtigen Batterie hängt von den spezifischen Anforderungen der Anwendung, den Kosten und den gewünschten Leistungsmerkmalen ab.

Batterietyp	Vorteile	Nachteile
Li-Ionen	hohe Energiedichte, lange Lebensdauer, geringes Gewicht	anfällig für Überhitzung, höhere Kosten, umwelt- bedenkliche Materialien
NiMH	robust, kostengünstig, moderate Energiedichte	geringere Energiedichte, kürzere Lebensdauer, ersetzt durch Li-Ionen
Blei-Säure	kostengünstig, zuverlässig, etablierte Technologie	schwer, niedrige Energiedichte, begrenzte Lebensdauer
Festkörper	hohe Energiedichte, hohe Sicherheit, lange Lebensdauer	derzeit teuer, noch in der Entwicklung, komplexe Herstellung

### Wie altern Batterien?

Batterien altern aufgrund physikalischer und chemischer Veränderungen, die im Laufe der Zeit und bei wiederholtem Gebrauch auftreten. Dieser Alterungsprozess verringert ihre Kapazität und Effizienz. Grundsätzlich lassen sich bei der Batteriealterung die Mechanismen Verlust von Aktivmaterial, Verlust von aktivem Lithium und Anstieg des Innenwiderstands unterscheiden. Beim Verlust von Aktivmaterial kommt es während der Lade- und Entladezyklen zu einer Deaktivierung der Speichermaterialien in der Anode oder Kathode. Dadurch kann von der Elektrode weniger Lithium aufgenommen werden. Dies führt zu einer geringeren Kapazität, da weniger Material für die chemischen Reaktionen zur Verfügung steht. Der Verlust von Lithium tritt hingegen durch chemische Reaktionen des in der Batterie enthaltenen Lithiums mit den Batterieelektrolyten auf. Hierdurch sinkt die Menge des in der Batterie zur Energiespeicherung verfügbaren Lithiums, was sich ebenfalls in einem Kapazitätsverlust äußert. Der Anstieg des Batteriewiderstands ist wiederum häufig auf die Bildung von festen Elektrolytschichten zurückzuführen, welche oft mit dem Verlust von aktivem Lithium einhergehen. Bei Lithium-Ionen-Batterien kann sich eine feste Elektrolyt-Interphase (SEI) auf der Anode bilden. Diese Schicht schützt zwar die Anode, kann aber wachsen und das Eindringen von Lithium-Ionen behindern, was insbesondere die Effizienz verringert.

Auslöser für diese Mechanismen kann z. B. die mechanische Degradation sein: Wiederholte Lade- und Entladezyklen können zu mechanischen Spannungen in den Elektroden führen. Dies kann Risse und strukturelle Schäden verursachen, die die Batterieleistung beeinträchtigen. Hohe Temperaturen beschleunigen zudem die chemischen Reaktionen, was zu einer schnelleren Degradation führt. Andererseits können sehr niedrige Temperaturen die Batterieleistung ebenfalls beeinträchtigen und die Alterung beschleunigen, wenn bei niedriger Batterietemperatur mit hoher Leistung geladen wird.

### Tipp

Durch gute Pflege, wie das Vermeiden von extremen Temperaturen und regelmäßiges, moderates Laden, kann die Lebensdauer von Batterien verlängert werden.





# Die Wertschöpfungskette der Batterie

## Batteriematerialien und ihre Herkunft

Zur Nachhaltigkeitsbewertung von Batterien ist insbesondere ein tieferes Verständnis der verwendeten Materialien und der Produktionsprozesse wichtig. Die verwendeten Materialien für Lithium-Ionen-Batterien sind entscheidend für ihre Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit. Zu den wesentlichen Materialien gehören Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan und Graphit, deren Herkunft und Gewinnung erhebliche Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft haben.

Lithium wird hauptsächlich in Salzseen und Festgesteinsminen abgebaut, mit bedeutenden Vorkommen in Chile, Australien und Argentinien. Der Abbau ist wasserintensiv und kann ökologische Einflüsse mit sich bringen. Die steigende Nachfrage nach Lithium erhöht den Druck auf diese Ressourcen. Allerdings macht Lithium nur einen kleinen Teil der Gesamtmasse einer Batterie aus, typischerweise deutlich weniger als 10%.

Kobalt ist wichtig für die Stabilität und Energiedichte der Kathode, wird jedoch in großen Teilen in der Demokratischen Republik Kongo gewonnen, in Teilen auch unter Bedingungen unzureichender Arbeitsstandards. Diese ethischen Probleme und der Kobaltpreis treiben die Forschung nach kobaltarmen oder -freien Alternativen voran. Die meisten heutzutage verbauten Batterien weisen gar keinen oder nur noch einen geringen Anteil an Kobalt auf.

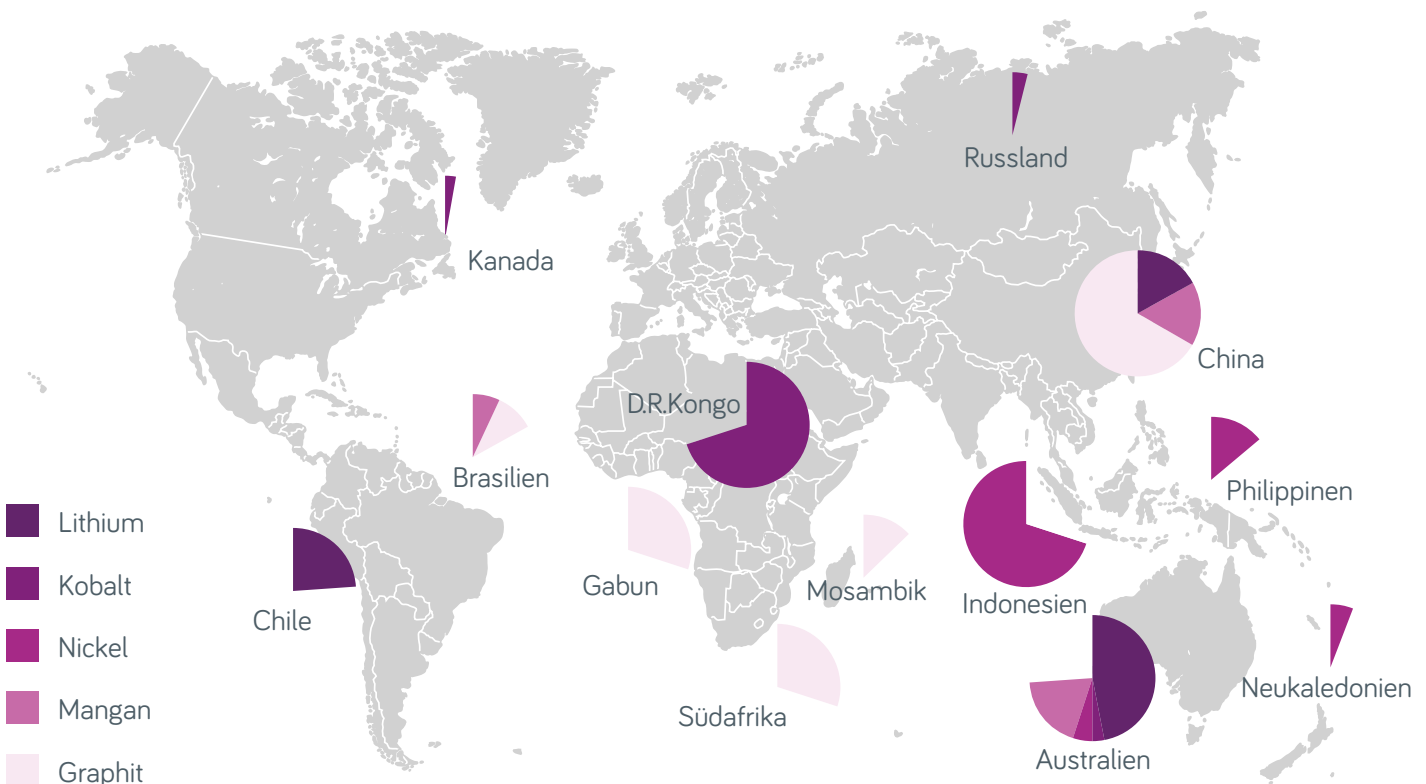


## 10 | Kapitelübersicht

Nickel und Mangan sind ebenfalls zentrale Komponenten für Kathodenmaterialien wie NMC. Nickel verbessert die Energiedichte und Lebensdauer der Batterien und wird hauptsächlich in Indonesien, Russland und Kanada abgebaut. Mangan, das die strukturelle Stabilität unterstützt, stammt aus Ländern wie Südafrika, Australien und China. Beide Metalle werden auch in der Stahlindustrie in großen Mengen verwendet, sodass hier bereits signifikante und gut ausgebaute Abbaukapazitäten bestehen.

Graphit ist das häufigste Anodenmaterial und wird überwiegend in China produziert. Der Abbau von natürlichem Graphit und die Herstellung von synthetischem Graphit können erhebliche Energiebedarfe und Umweltbelastungen mit sich bringen. In aktuellen Recyclingprozessen wird Graphit meist noch nicht zurückgewonnen, sodass Weiterentwicklungen der Recyclingprozesse hier einen großen Mehrwert liefern können.

### Herkunft der Batteriematerialien



Quelle: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/manganese-statistics-and-information>,  
<https://www.visualcapitalist.com/ranked-the-worlds-largest-lithium-producers-in-2023/>

Die nachhaltige und ethische Gewinnung dieser Rohstoffe stellt eine große Herausforderung dar. Es gibt daher Bestrebungen, die Materialeffizienz zu verbessern, Recyclingprozesse zu optimieren und alternative Materialien zu entwickeln. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die Umweltauswirkungen zu minimieren und die sozialen Bedingungen in den Abbauregionen zu verbessern, um eine nachhaltigere Zukunft der Batterietechnologie zu gewährleisten.

## 11 | Kapitelübersicht

### Wie wird eine Batterie gebaut?

Der Fertigungsprozess einer Batterie umfasst mehrere komplexe Schritte, von der Materialvorbereitung bis zur finalen Montage. Die Herstellung beginnt mit der Vorbereitung der Aktivmaterialien für die Anode und Kathode. Diese Materialien kommen aus vorangegangenen Aufbereitungs- und Syntheseprozessen. Die Materialien werden fein gemahlen und mit Bindemitteln und Leitfähigkeitsadditiven gemischt, um eine Paste, die auch als „Slurry“ bezeichnet wird, zu bilden.

Der Slurry wird auf dünne Metallfolien aufgetragen – Kupfer für die Anode und Aluminium für die Kathode. Diese beschichteten Folien werden dann getrocknet und durch Walzen verdichtet, sodass die Batterie ein geringeres Gesamtvolumen benötigt. Nach dem Trocknen werden die Elektroden präzise auf die notwendigen Dimensionen zugeschnitten. Die geschnittenen Elektroden werden anschließend zusammen mit einem Separator, der die Anode und Kathode voneinander trennt, gestapelt oder zu einer Rolle gewickelt. Diese „Zelle“ wird dann in ein Gehäuse eingebracht, das in verschiedenen Formen wie z. B. zylindrisch oder prismatisch vorliegen kann. Ein Elektrolyt, der die Ionenbewegung ermöglicht, wird anschließend in die Zelle eingefüllt. Abschließend wird die Zelle hermetisch versiegelt, um den Eintritt von Luft und Feuchtigkeit zu verhindern.

Nach der mechanischen Fertigstellung durchläuft die Zelle einen Formierungsprozess, bei dem sie unter kontrollierten Umgebungsbedingungen mehreren Lade- und Entladezyklen unterzogen wird, um die elektrochemische Struktur zu stabilisieren. Dieser präzise und sorgfältig kontrollierte Prozess gewährleistet die Herstellung leistungsfähiger, sicherer und langlebiger Batterien.

### Von der Batterie zum Elektroauto

Der Weg von der Batterie zum Elektroauto umfasst mehrere entscheidende Schritte, die zusammen eine funktionale und effiziente Fahrzeuglösung ergeben. Der Prozess beginnt mit der Entwicklung und Herstellung der Batteriezellen. Nach der Zellproduktion werden die Zellen zu Modulen und schließlich zu vollständigen Batteriepacks zusammengebaut. Diese Batteriepacks sind das Herzstück eines Elektroautos und müssen strengen Qualitäts- und Sicherheitsprüfungen standhalten. Die entwickelten Batteriepacks werden in das Design und die Architektur des Elektroautos integriert. Die Batterie ist dabei optimal im Fahrzeug zu platzieren, um die Sicherheit, Effizienz und den Fahrkomfort zu maximieren. Dies umfasst die Entwicklung von Kühlsystemen, um die Batterietemperatur zu regulieren, sowie die Integration eines Batteriemanagementsystems (BMS), das die Leistung und Gesundheit der Batterie überwacht.

Parallel zum Batteriedesign hat auch das Design des Fahrzeugs selbst einen erheblichen Einfluss auf die Anforderungen an die Batterie. Dies schließt die Konstruktion des elektrischen Antriebsstrangs, die Steuerungselektronik und die Software ein, die das Fahrzeug antreiben und steuern. Durch eine Optimierung der Aerodynamik, des Gewichts und der Energieeffizienz lassen sich Reichweite und Leistung des Elektroautos maximieren. Durch diese gut orchestrierten Schritte wird aus einer Batterie ein leistungsfähiges und sicheres Elektroauto, das den Anforderungen der modernen Mobilität gerecht wird.



# Nachhaltigkeit von Batterien

## Elektroautos und die Energiewende

Elektroautos spielen eine entscheidende Rolle in der Energiewende, indem sie den Übergang zu nachhaltiger Mobilität, die Reduzierung der Emissionen im Verkehrssektor und eine saubere Energiezukunft unterstützen:

### Reduktion der lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen:

Elektroautos verursachen keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen, da sie elektrisch betrieben werden. Dies verringert die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor erheblich. Auch indirekte Emissionen für die Bereitstellung des Stroms lassen sich reduzieren, wenn der Strom aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind, Sonne oder Wasserkraft stammt. Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren tragen Elektroautos somit signifikant zur Luftreinhaltung und zur Reduzierung des Klimawandels bei.



### Integration erneuerbarer Energien:

Mit der Energiewende verschiebt sich das Energiesystem von einem auf fossilen Energieträgern basierten System zu einem auf erneuerbaren Energien basierten System. Damit wird Energie aus Wind und Sonne zunächst als elektrische Energie bereitgestellt. Dies macht die Bereitstellung von Kraftstoffen wiederum viel aufwändiger, da diese in einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem, unter Nutzung von elektrischer Energie, aufwändig hergestellt werden müssen. Elektroautos können zudem als mobile Energiespeicher fungieren. Mit Technologien wie Vehicle-to-Grid (V2G) können Elektrofahrzeuge überschüssigen Strom aus erneuerbaren Quellen speichern und bei Bedarf wieder ins Netz einspeisen. Dies unterstützt die Netzstabilität und ermöglicht eine effizientere Nutzung von erneuerbarer Energie, indem Schwankungen im Energieangebot ausgeglichen werden.



### Förderung der Energieeffizienz:

Elektrofahrzeuge sind zudem effizienter als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Ein Großteil der Energie, die in einer Batterie gespeichert wird, wird tatsächlich in Bewegung umgesetzt, während bei Verbrennungsmotoren ein erheblicher Teil der Energie als Wärme verloren geht. Diese höhere Effizienz trägt zur Gesamtenergieerduzierung bei.



### Ökobilanz von Elektroauto-Batterien

Die Ökobilanz von Elektroauto-Batterien ist ein komplexes Thema, das verschiedene Aspekte von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung umfasst. Bei der Ökobilanzierung kann zudem zwischen einer Vielzahl von Wirkungskategorien wie CO<sub>2</sub>-Emissionen, Flächennutzung, Wasserverbrauch etc. unterschieden werden. Der gesamte Lebenszyklus einer Batterie beeinflusst ihre Ökobilanz, sodass die Phasen Rohstoffgewinnung, Batterieherstellung, Nutzungsphase und Recycling gemeinsam betrachtet werden müssen.

#### **Rohstoffgewinnung:**

Die Gewinnung von Materialien wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit hat erhebliche Auswirkungen auf den ökologischen Fußabdruck. Je nach Förderort, Verfahren und Transportweg können bereits bei der Auswahl der Batteriematerialien erhebliche Unterschiede zwischen unterschiedlichen Batterien entstehen. Insbesondere durch die Auswahl der Batteriematerialien lässt sich bei der Rohstoffgewinnung bereits ein großer Schritt zu umweltfreundlichen Technologien leisten.

#### **Herstellung:**

Die Produktion von Batteriezellen ist energieintensiv und trägt daher zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Wichtige, energieintensive Teilschritte sind dabei die Trocknung der Elektrodenbeschichtungen und die Formierung nach Fertigstellung der Batteriezelle. Beide Prozessschritte weisen durch neuartige Verfahren wie Trockenbeschichtung und die Rückspeisung der Energie aus der Formierung aber auch enorme Potenziale zur Reduktion des Energiebedarfs auf. Der Energieverbrauch variiert zudem je nach Produktionsstandort und den verwendeten Energiequellen. Fabriken, die erneuerbare Energien nutzen, können die CO<sub>2</sub>-Bilanz bei der Batterieproduktion daher erheblich verbessern.

#### **Nutzung:**

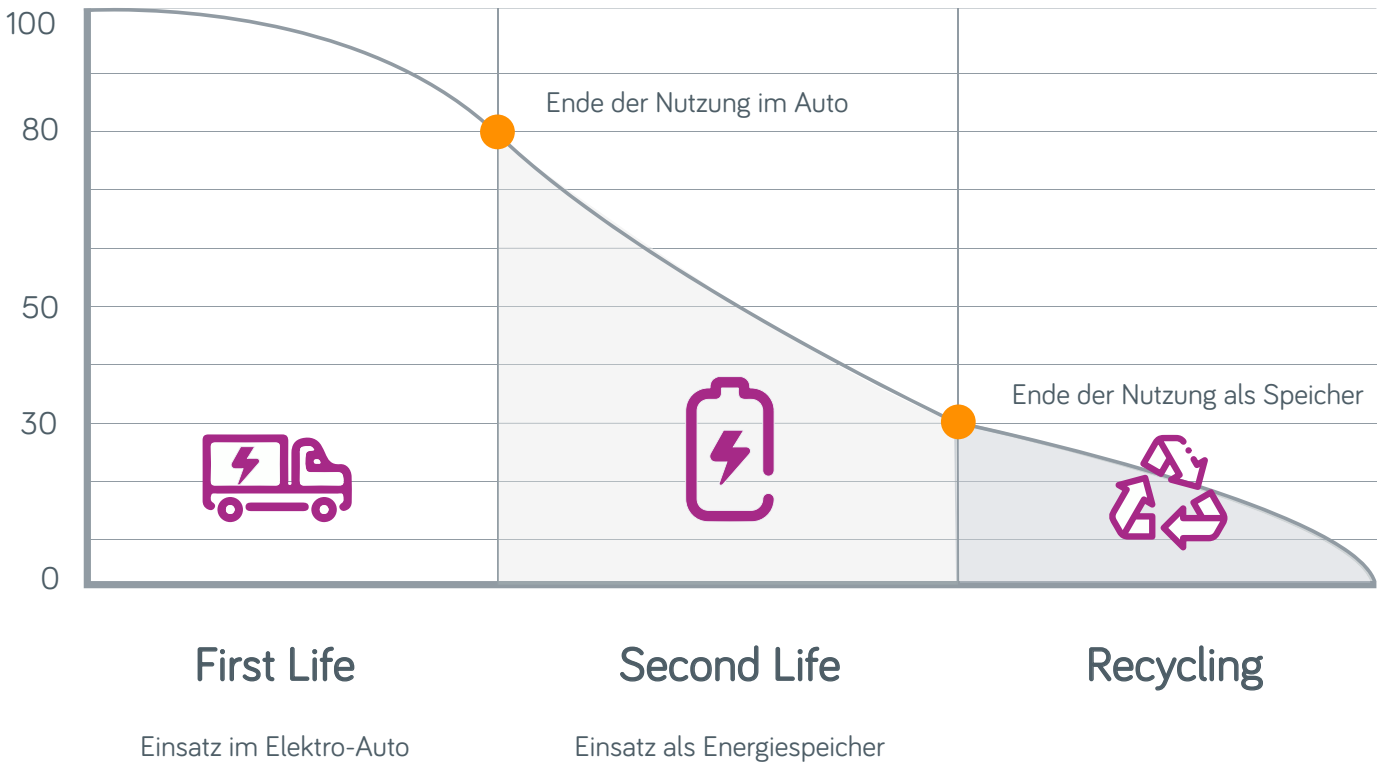
Während der Nutzung von Elektrofahrzeugen entstehen keine direkten Emissionen. Es fallen allerdings Emissionen für die Bereitstellung des Stroms für das Laden des Elektroautos an. Der Umfang dieser Emissionen ist dabei stark abhängig von der Art der genutzten Energie. Wenn der Strom für das Laden aus erneuerbaren Quellen stammt, verbessert sich die Ökobilanz erheblich und es fallen nur sehr geringe Emissionen an. Wird mit einem typischen Netzstrom-Mix geladen, enthält dieser sowohl Strom aus erneuerbaren Energien als auch Strom aus fossilen Energieträgern. Das Verhältnis dieser beiden Bezugsquellen verändert sich dabei stark, je nach Wetterlage und Energiebedarf im Netz. Zu Zeiten mit hoher Sonneneinstrahlung und Wind oder bei geringem Energiebedarf aus dem Netz ist der Anteil an erneuerbaren Energien im Strommix höher, sodass es zu geringeren Emissionen für die Bereitstellung des Ladestroms kommt. Die Effizienz und der geringere Energieverbrauch von Elektroautos im Vergleich zu Verbrennungsmotoren tragen ebenfalls positiv zur Umweltbilanz bei.

## Recycling und Entsorgung:

Am Ende ihres Lebenszyklus müssen Batterien recycelt werden, um wertvolle Materialien zurückzugewinnen und Umweltschäden zu minimieren. Derzeit werden Recyclingkapazitäten für Altbatterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland noch ausgebaut und Recyclingverfahren sind oft noch nicht vollständig optimiert. Beim Recycling wird einerseits zusätzliche Energie und zusätzliche Ressourcen für den Prozess benötigt, andererseits können aber wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen werden, welche dadurch für die Fertigung neuer Batterien verwendet und nicht neu gewonnen werden müssen. In vielen Fällen hat das Recycling somit einen positiven Einfluss auf die Gesamtkobilanz der Batterie.

## Lebenszyklus einer Elektroauto-Batterie

Batteriekapazität in %



Quelle: <https://guide.autoscout24.ch/de/elektromobilitaet/lebensdauer-elektroauto/>

### Elektrofahrzeuge im Ökobilanzvergleich: Produktions- vs. Nutzungsemissionen

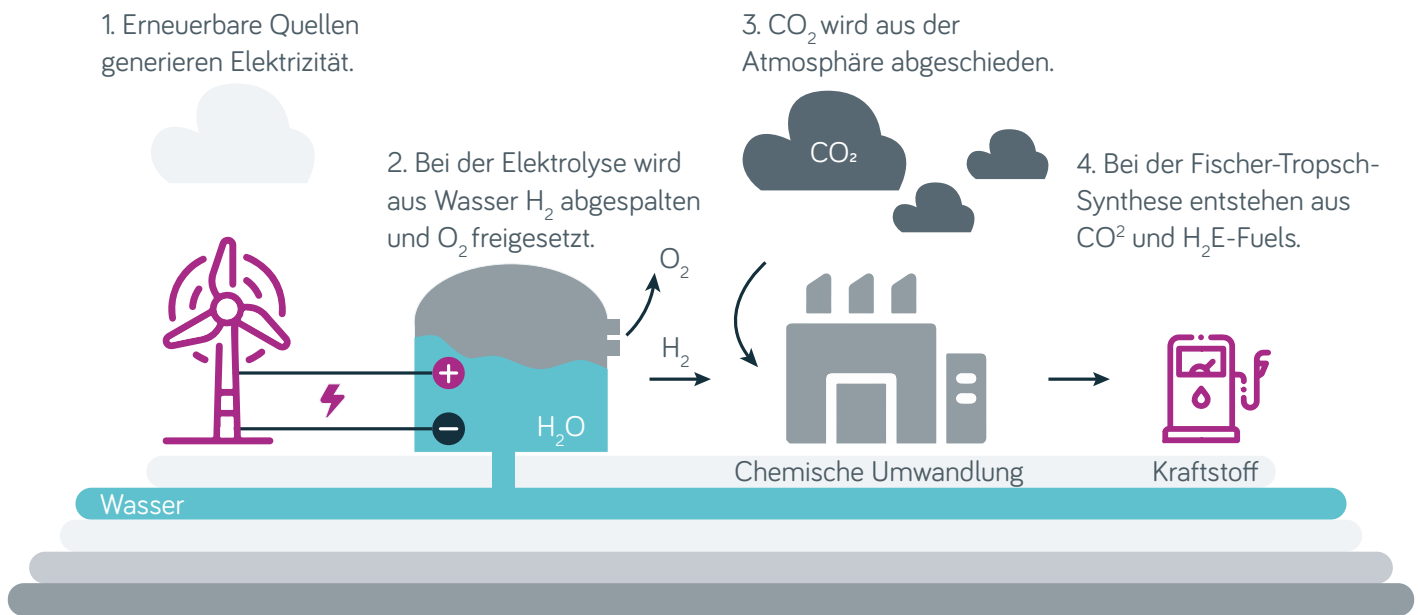
Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen kann es in unterschiedlichen Studien teils zu erheblichen Unterschieden in der Ökobilanz im Vergleich zu anderen Technologien kommen. Insbesondere Faktoren wie der zugrundeliegende Strommix, Technologie und Herkunftsland der Batterien und das Mobilitätsverhalten des Nutzers können hier einen erheblichen Einfluss haben. Allgemein zeigen die meisten Studien aber, dass Elektrofahrzeuge während der Produktionsphase mehr Emissionen verursachen, was in der Nutzungsphase durch geringere Emissionen wieder ausgeglichen wird. Die höheren Emissionen während der Produktion sind dabei der Batterieherstellung zuzuschreiben, während die geringeren Emissionen aus der Nutzungsphase sich aus einem höheren Wirkungsgrad und der teilweisen Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien ergeben. Somit kommt es nach einer gewissen Nutzungsdauer oder nach einer gewissen Anzahl gefahrener Kilometer zu einem Punkt, ab dem das Elektrofahrzeug in Summe weniger Emissionen verursacht hat als die Verbrenneralternative. Je nach Studie liegt dieser Punkt oft bei einer Gesamtfahrleistung von 50.000 km bis 100.000 km, teils aber auch deutlich darunter oder darüber.

### Technologiealternativen: Wasserstoff und E-Fuels

Bei der Betrachtung der Ökobilanz von Batterien lohnt sich auch ein Blick auf die möglichen Technologiealternativen E-Fuels und Wasserstoff. Die Ökobilanz von Wasserstoff und E-Fuels im Vergleich zu Batterien zeigt unterschiedliche Umweltbelastungen und Effizienzpotenziale auf, die für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors von Bedeutung sind. Wasserstoff kann durch Elektrolyse aus Wasser gewonnen werden, wobei erneuerbare Energien eingesetzt werden können. Dies führt zu einer sauberen Energiequelle mit geringen direkten Emissionen. Allerdings ist die Herstellung von grünem Wasserstoff energieintensiv. Die Effizienz des gesamten Wasserstoffkreislaufs, einschließlich Erzeugung, Speicherung, Transport und Umwandlung von Strom in Brennstoffzellen, ist deutlich niedriger als die direkte Nutzung von Batteriestrom. Dennoch bietet Wasserstoff Vorteile für Anwendungen, bei denen Batterien aufgrund von Gewicht oder Reichweite weniger praktikabel sind, wie im Schwerlastverkehr und in der Luftfahrt. Durch den geringeren Wirkungsgrad müssen bei der Nutzung von Wasserstoff jedoch deutlich mehr PV- und Windkraftanlagen aufgebaut werden, um die gleiche Menge an Mobilität zu ermöglichen. Gerade im PKW-Bereich weisen aktuelle Trends daher klar in Richtung batterieelektrischer Fahrzeuge.



## Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe



Quelle: <https://www.tuev-nord.de/de/privatkunden/ratgeber-und-tipsps/auto-ratgeber/e-fuels/>

E-Fuels werden synthetisch aus Wasserstoff und  $CO_2$  hergestellt und können als flüssige Brennstoffe in konventionellen Verbrennungsmotoren verwendet werden. Dadurch werden weniger Ressourcen für die initiale Produktionsphase benötigt. Allerdings ist die Produktion von E-Fuels noch energieintensiver als für Wasserstoff und in Kombination mit dem geringeren Wirkungsgrad erfordern E-Fuels noch größere Mengen an erneuerbarem Strom. Der Vorteil von E-Fuels liegt vor allem in ihrer Kompatibilität mit bestehenden Infrastrukturen und Fahrzeugtechnologien, was unter Voraussetzung wirtschaftlich konkurrenzfähiger Syntheseprozesse eine Übergangslösung darstellen könnte.

## Trends und Maßnahmen zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks

Die Verringerung des ökologischen Fußabdrucks von Batterien ist ein zentrales Ziel in der Weiterentwicklung der Elektromobilität und der Energiespeicherung. Hierzu gibt es mehrere Trends und Maßnahmen. Die Materialforschung konzentriert sich auf die Entwicklung von Batterien mit weniger kritischen Materialien wie Kobalt und die Erhöhung der Energiedichte, wodurch weniger Rohstoffe für dieselbe Energiemenge benötigt werden. Beispielsweise gewinnen NMC mit hohem Nickelgehalt und LFP zunehmend an Bedeutung, da sie sowohl Leistungsfähigkeit und Sicherheit bei geringeren Materialkosten und geringem ökologischem Fußabdruck bieten.

Effektive Recyclingtechnologien sind entscheidend, um wertvolle Materialien zurückzugewinnen und die Umweltauswirkungen zu minimieren. Fortschritte in der Recyclingtechnologie ermöglichen es, einen größeren Teil der Batteriematerialien wiederzuverwenden, was den Bedarf an neu abgebauten Rohstoffen reduziert.



## 17 | Kapitelübersicht

Auch die Wiederverwendung von Batterien in weniger anspruchsvollen Anwendungen in einem sogenannten Second Life Szenario verlängert deren Lebenszyklus und kann so einen zusätzlichen Nutzen ermöglichen. Die Verwendung von erneuerbaren Energien in der Batteriefertigung reduziert den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck erheblich. Hersteller investieren in grüne Produktionsanlagen und optimieren Prozesse, um den Energieverbrauch zu senken. Insbesondere bei der Planung, der in Europa angekündigten Batterieproduktionsanlagen, haben erneuerbare Energien zur Stromversorgung der Fabriken einen erheblichen Stellenwert. Festkörperbatterien und alternative Batterietechnologien wie Natrium-Ionen-Batterien, die kostengünstiger und umweltfreundlicher sind, werden zudem intensiv erforscht.

Diese neuen Technologien könnten die Abhängigkeit von seltenen und umweltbelastenden Materialien weiter verringern. Regierungen und internationale Organisationen setzen zunehmend auf strengere Umweltauflagen und Anreize für nachhaltige Batterieproduktion und -recycling. Vorschriften zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks und Förderprogramme für Forschung und Entwicklung tragen dazu bei, die Industrie in eine nachhaltigere Richtung zu lenken. Durch diese Maßnahmen und Trends wird der ökologische Fußabdruck von Batterien signifikant verringert, was einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit und zur erfolgreichen Energiewende darstellt.

### Wie viel Batterie braucht ein Elektroauto?

Gerade zur Reduzierung der durch die Batterieproduktion erzeugten Emissionen, gibt es neben der Weiterentwicklung der Materialien und Prozesse aber auch eine weitere mögliche Maßnahme: Die Verringerung der Batteriegröße. Reichweite und damit verbunden auch die Batteriegröße werden oft als wichtiges Kriterium für die Akzeptanz von Elektromobilität genannt. Gleichzeitig ist die mittlere tägliche Fahrleistung pro Fahrzeug und auch die mittlere Wegstrecke weitaus geringer als die Reichweite vieler Elektrofahrzeuge. Ein großer Teil des Mobilitätsbedarfs vieler Personen könnte daher auch mit wesentlich kleineren Batterien mit Reichweiten von ca. 100 Kilometern erfüllt werden. Gerade in Kombination mit immer schnelleren Ladezeiten ergeben sich so weitere Möglichkeiten, die Gesamtemissionen durch eine Reduzierung der Batteriegröße ohne signifikanten Komfortverlust zu realisieren.



### Der ideale Betrieb für eine lange Batterielebensdauer

Neben den Emissionen ist für die Ökobilanz insbesondere die Nutzungsdauer von Batterien von wesentlicher Relevanz. Je länger eine Batterie genutzt werden kann, desto länger können Emissionen während der Nutzung eingespart werden, bevor eine neue Batterie produziert werden muss. Durch eine batterie-schonende Nutzung kann die Lebensdauer der Fahrzeugbatterie dabei erheblich verlängert werden: Ein optimaler Ladezustand liegt bei mittleren Ladezuständen.

#### Wichtig!

Vollständiges Aufladen (100%) oder Entladen (0%) sollte vermieden werden, da extreme Ladezustände die Batteriechemie belasten und zur schnelleren Degradation führen. Viele moderne Elektroautos bieten die Möglichkeit, das Ladelimit zu setzen, um dies zu erleichtern.

Batterien reagieren zudem empfindlich auf extreme Temperaturen. Idealerweise sollte die Betriebstemperatur zwischen 15 °C und 30 °C liegen. Ein aktives Temperatur-Management-System, das die Batterie kühlt oder wärmt, kann dazu beitragen, optimale Bedingungen zu gewährleisten. Parken im Schatten im Sommer hilft ebenfalls, die Batterietemperatur stabil zu halten. Außerdem kann regelmäßiges Schnellladen die Lebensdauer der Batterie verkürzen, da der hohe Strom eine stärkere Belastung für die Materialien darstellt. Für den täglichen Gebrauch sollten langsame oder moderate Ladevorgänge bevorzugt werden. Schnellladen sollte nur bei Bedarf, beispielsweise auf langen Reisen, genutzt werden. Durch die Beachtung dieser Maßnahmen kann die Lebensdauer der Batterie in einem Elektroauto deutlich verlängert und die Gesamtleistung des Fahrzeugs über viele Jahre hinweg aufrechterhalten werden.

### Mehr Nutzen aus der gleichen Batterie: Smart Charging, Vehicle-to-Home und Vehicle-to-Grid

Smart Charging, Vehicle-to-Home (V2H) und Vehicle-to-Grid (V2G) sind innovative Technologien, die Elektroautos aktiv in das Energiesystem einbinden. Beim Smart Charging wird das Elektroauto, wenn möglich, immer dann geladen, wenn der Strom durch viele erneuerbare Energien im Energiemix besonders günstig ist und gleichzeitig wenig CO<sub>2</sub>-Emissionen beinhaltet. Vehicle-to-Home (V2H) ermöglicht es zusätzlich, die Batterie eines Elektroautos ähnlich wie bei einem Batterieheimspeicher als Energiespeicher für ein Haus zu nutzen. Diese Funktion ermöglicht es, überschüssige Energie aus erneuerbaren Quellen, wie Solarenergie, effizient zu nutzen. Tagsüber gespeicherte Solarenergie aus eigener Erzeugung kann abends und nachts genutzt werden, was die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen reduziert und Energiekosten senkt. Vehicle-to-Grid (V2G) erweitert dieses Konzept, indem Elektroautos in das öffentliche Stromnetz integriert werden. Fahrzeuge können nicht nur Strom beziehen, sondern auch in das Netz zurückspeisen. Dies unterstützt die Netzstabilität, indem es Spitzenlasten abfedert und die Effizienz der Energieverteilung erhöht. Elektroautos können als flexible, dezentrale Energiespeicher fungieren, die erneuerbare Energien besser integrieren und Schwankungen im Stromnetz ausgleichen. Besitzer von Elektroautos können dabei finanziell profitieren, indem sie für die Bereitstellung von Strom während Hochlastzeiten entlohnt werden. Diese drei Technologien fördern die Nutzung erneuerbarer Energien und tragen zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei und stellen somit wesentliche Bausteine für eine nachhaltigere und resilientere Energieinfrastruktur dar.

### Batteriesicherheit

Batteriespeicher sind eine sichere Technologie, wenn alle Komponenten hochwertig gefertigt sind, das Batteriemanagementsystem ordnungsgemäß funktioniert und die Betriebsdaten regelmäßig analysiert werden. Trotz eines gewissen Brandrisikos, das auch bei anderen Elektronikgeräten besteht, wird dieses Risiko oft überschätzt. Untersuchungen in Ländern wie Norwegen und Schweden zeigen, dass Elektrofahrzeuge ein geringeres Brandrisiko als Verbrenner haben. Die Sicherheit hängt dabei stark von der Produktqualität ab. Unabhängig von der Zelltechnologie ist es wichtig, das gesamte Speichersystem zu betrachten. Brände können durch verschiedene Ursachen ausgelöst werden.

Die größten Rückrufaktionen in der Elektromobilität waren auf Produktionsfehler zurückzuführen, die zu Kurzschlüssen innerhalb der Zellen führten.

Es gab auch Berichte über Fehler bei der Verschaltung der Zellen oder im Batteriemanagementsystem. Bei einem Fehlerfall kann es zu einem Prozess kommen, bei dem sich Zellen stark erwärmen und ggf. in Brand geraten, was als Thermal Runaway Propagation bekannt ist. Dies kann durch hohe Verlustleistungen aufgrund von Defekten, Kurzschlüssen oder chemische Zersetzungen verursacht werden. Das Batteriemanagementsystem überwacht Spannung, Strom und Temperatur, um kritische Zustände zu verhindern. Es kann Spannung an jeder Zelle und Strom für parallel verschaltete Zellen messen. Die Temperatur wird an mehreren Stellen aufgezeichnet, um auffällige Temperaturen zu erkennen. Während das BMS kritische Zustände verhindern soll, sind tiefgehende Analysen über die Batterielebensdauer oft nicht möglich ohne komplexe Algorithmen und Cloud-Auswertungen. Es gibt keine pauschalen Aussagen über das Brandrisiko verschiedener Lithium-Ionen-Speichertypen. Lithium-Eisenphosphat-Batterien bieten Sicherheitsvorteile, da sie bei Überladung oder Überhitzung weniger Energie freisetzen. Trotzdem enthalten sie brennbare Bestandteile und können im Kurzschlussfall schlagartig Wärme freisetzen.



# Batterien am Lebensdauerende: Recycling und Zweitnutzung

## Das Nutzungsende im Fahrzeug: Zahlen, Fakten und Trends

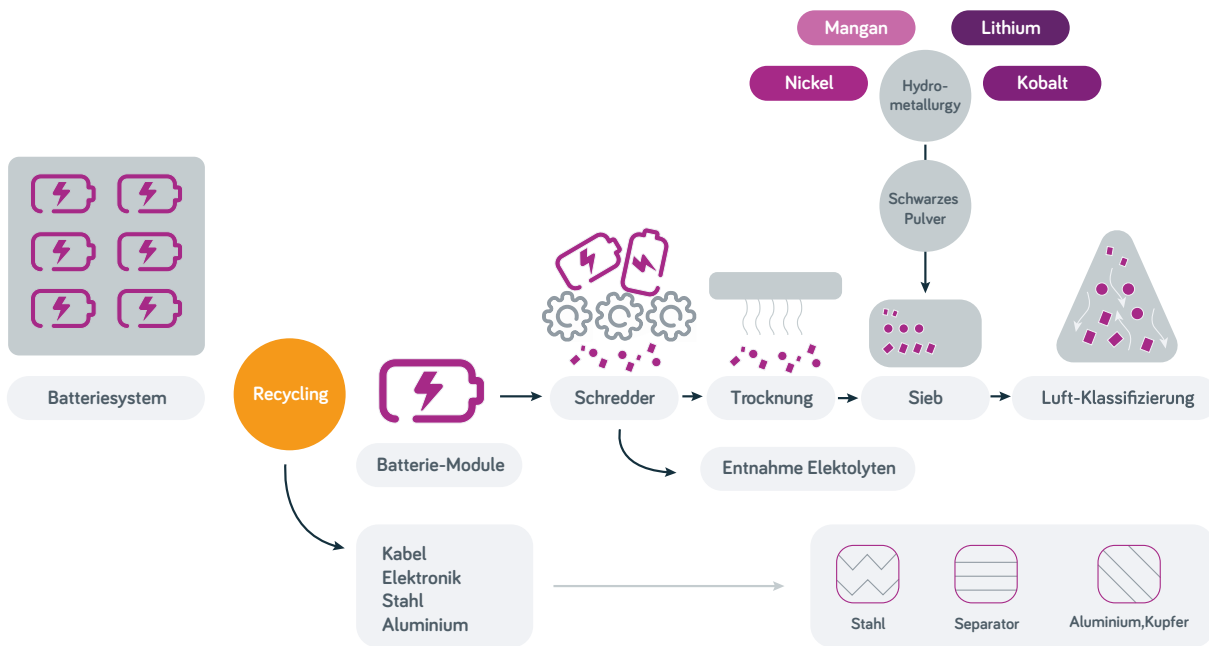
Oft wird das Lebensdauerende einer Batterie angenommen, wenn sie eine Restkapazität von 80% der ursprünglichen Kapazität erreicht hat oder wenn sich ihr elektrischer Widerstand verdoppelt hat. Bei einem stärkeren Alterungszustand zeigt sich in Laboruntersuchungen oft ein Fehler, bei dem die Batterie in kurzer Zeit sehr viel Kapazität verliert und danach gar nicht mehr nutzbar ist. Allerdings wird das Auftreten dieses schnellen Ausfalls von diversen Faktoren beeinflusst, sodass aktuell in vielen Fällen noch gar nicht absehbar ist, ob das Erreichen von 80% Restkapazität im Elektroauto tatsächlich das Lebensdauerende darstellt. Ein Fahrzeug mit einer Reichweite von 400 km erreicht zudem eine Gesamtlauflistung von 200.000 km bereits mit 500 Lade- und Entladezyklen, was für viele Batterien weit weniger Zyklen als deren angenommener Lebensdauer entspricht. Auch Ausfälle von Fahrzeugen, bevor die Batterie das Lebensdauerende erreicht, sind damit denkbar, insbesondere bei den tendenziell langlebigen LFP-Batterien. Was aber klar ist: mit einer steigenden Anzahl an Neuzulassungen von Elektroautos steigt auch die Anzahl an Batterien, die früher oder später ihr Lebensdauerende erreichen werden, sodass Strategien zum Umgang mit diesen Batterien gefunden werden müssen. Im Jahr 2023 überstieg die in Elektroautos installierte Batteriekapazität die Gesamtkapazität stationärer Batteriespeicher bereits um einen Faktor 10.



### Wie werden Batterien recycelt?

Das Recycling von Batterien ist ein wichtiger Prozess zur Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe und zur Minimierung von Umweltauswirkungen durch die Entsorgung von Batterien.

#### So werden Batterien recycelt



Quelle: <https://emobilitaet.business/wissensdatenbank/batterie/7239-wie-lassen-sich-batterien-von-elektroautos-recyclen>

Der Recyclingprozess von Batterien beginnt zunächst mit der Sammlung und dem Transport: Alte Batterien werden gesammelt und zu spezialisierten Recyclinganlagen transportiert. Dies kann durch Rücknahmesysteme von Herstellern, Händlern oder spezialisierten Recyclingunternehmen erfolgen. Anschließend werden die Batterien idealerweise sortiert, damit Batterien mit unterschiedlicher Materialzusammensetzung in darauf abgestimmten Recyclingprozessen weiterverarbeitet werden können. Ein vorgelagerter Entladeprozess macht das Recycling sicherer und erleichtert eine mögliche nachfolgende Demontage, bei der das Batteriepack in einzelne Module zerlegt wird, welche dann separat dem Recycling zugeführt werden können. Anschließend kann eine thermische Behandlung erfolgen, bei welcher die einzelnen Batteriezellen sich öffnen und der flüchtige Elektrolyt entweichen kann. Danach folgen weitere Schritte der Zerkleinerung und Auftrennung durch mechanische Verfahren. Bei einer nachfolgenden pyrometallurgischen Behandlung werden die enthaltenen Metalle von anderen Komponenten als flüssiges Metall abgetrennt, wohingegen bei hydrometallurgischem Recycling die einzelnen Batteriekomponenten durch die Auflösung in Säuren voneinander getrennt werden. Beide Verfahren können zudem auch kombiniert werden. In abschließenden Aufreinigungsschritten können die enthaltenen Wertstoffe so weit verarbeitet werden, dass sie wieder für die Batterieproduktion verwendet werden können, wodurch ein geschlossener Materialkreislauf entsteht. Der Recyclingprozess von Batterien trägt dazu bei, wertvolle Ressourcen zu schonen, Abfälle zu minimieren und die Nachhaltigkeit von Batterietechnologien zu fördern. Fortschritte in der Technologie und im Recycling-Management sind entscheidend, um die Effizienz und Wirtschaftlichkeit dieses Prozesses kontinuierlich zu verbessern.

### Second Life: Lohnt sich eine Zweitnutzung nach dem Auto?

Second Life Batterien sind eine vielversprechende Möglichkeit, die Nutzungsdauer von Elektroauto-Batterien zu verlängern und ihre ökonomische sowie ökologische Effizienz zu steigern. Nachdem Batterien am Lebensdauerende aus Elektroautos ausgebaut werden, können sie prinzipiell noch für andere Anwendungen weiterverwendet werden. Entscheidend hierfür ist der Grund, warum die Batterie nicht mehr im Fahrzeug genutzt werden kann. Handelt es sich beispielsweise um ein Unfallfahrzeug mit einer nur geringfügig gealterten Batterie, kann diese noch viel Nutzen in einer anderen Anwendung erbringen. Doch auch bei stark gealterten Batterien kann eine Nachnutzung noch sinnvoll sein: Durch die Verringerung der Laderate im Vergleich zum Schnellladen im Fahrzeug sind deutlich längere Lebensdauern in der Zweitnutzungsanwendung prinzipiell möglich. Hier ist allerdings eine eigene Entscheidung für jede Fahrzeugbatterie zu treffen, ob sich eine Zweitnutzung ökologisch und ökonomisch lohnt oder nicht. Auch die Passfähigkeit der Batteriezelle zur gewählten Zweitnutzungsanwendung ist zu prüfen, da einige Anwendungen beispielsweise deutlich höhere Anforderungen an die Anzahl an Lade- und Entladezyklen der Batterie haben als dies bei Elektroautos der Fall ist.

Eine der Hauptanwendungen für Second Life Batterien ist die stationäre Energiespeicherung. Diese Batterien können als Pufferspeicher für erneuerbare Energien dienen, um Schwankungen im Stromnetz auszugleichen und die Netzstabilität zu verbessern. Sie ermöglichen es, überschüssige Energie aus Wind- und Solarkraftwerken zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. Dabei sind Größenordnungen von Industriespeichern bis hin zu Großspeichern möglich. Somit kommen die Batterien auch nach dem Nutzungsende im Fahrzeug noch der Energiewende zugute und können prinzipiell die Aufstellung von besonders kostengünstigen Speichern ermöglichen. Weitere relevante Anwendungen sind Pufferspeicher im Bereich von Schnellladesäulen: hier können Second Life Batterien die notwendige Netzanschlussleistung reduzieren und somit den Ausbau von Ladeinfrastruktur beschleunigen. Die Wiederverwendung von Batterien reduziert die unmittelbaren Kosten für die Entsorgung und das Recycling, da die Batterie länger genutzt wird und diese Kosten somit erst später anfallen und durch technologischen Fortschritt ggf. geringer ausfallen. Zudem bietet sie prinzipiell zusätzliche Einnahmequellen für Fahrzeugbesitzer oder Flottenbetreiber, indem sie die Batterien nach ihrem ersten Leben weiterverkaufen. Second Life Batterien tragen zudem zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks bei, indem sie den Bedarf an neuen Batterien und den Abbau von Rohstoffen verringern. Dies unterstützt die Nachhaltigkeitsziele und fördert die Kreislaufwirtschaft.



# Batterien im Spannungsfeld zwischen Modularität und Vollintegration

Im Bereich der Batterietechnologie steht die Frage nach Modularität versus Vollintegration im Mittelpunkt der aktuellen Entwicklungen. Aktuelle Trends zeigen eine Tendenz zur Integration von Batterien in Fahrzeugplattformen, um Platz zu sparen, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren und die Fahrzeugarchitektur zu optimieren.

Der Trend zur Vollintegration hat jedoch Auswirkungen auf Wartung und Recycling. Da die Batterien fest im Fahrzeug verbaut sind, gestaltet sich die Wartung komplexer und im Fall der Integration von Batteriezellen direkt in die Karosserie kann ein Tausch ggf. gar nicht möglich sein. Dies kann die Wartungskosten erhöhen und die Zugänglichkeit zu Batteriekomponenten erschweren, was wiederum Auswirkungen auf die Lebensdauer und Nachhaltigkeit der Batterie haben kann.

In diesem Kontext gewinnen Batteriewechselsysteme als alternatives Konzept zunehmend an Bedeutung, insbesondere auf dem asiatischen Markt. Diese Systeme ermöglichen es, die Batterien schnell auszutauschen, ähnlich wie der Tankvorgang bei konventionellen Fahrzeugen. Durch standardisierte Batteriepakete können Fahrzeuge innerhalb weniger Minuten aufgeladen werden, was die Reichweitenangst mindert und die Ladeinfrastruktur flexibler gestaltet. Batteriewechselsysteme könnten auch die Wartung vereinfachen und die Lebensdauer der Batterien verlängern, da defekte Batterien schnell ausgetauscht werden können.

Für die Zukunft der Elektromobilität bleibt die Frage nach der optimalen Balance zwischen Vollintegration und Modularität entscheidend. Während Vollintegration gegenüber einer modularen Bauweise Vorteile in Bezug auf Effizienz und Leistung bietet, könnten Batteriewechselsysteme neue Möglichkeiten zur Steigerung der Benutzerfreundlichkeit und Nachhaltigkeit eröffnen. Die weitere Entwicklung wird zeigen, wie sich diese Trends auf die Fahrzeugtechnik, Wirtschaftlichkeit und Umweltbilanz der Elektromobilität auswirken werden.

# Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

**Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen** spielen eine entscheidende Rolle bei der Förderung und Entwicklung von Batterietechnologien im Kontext der Elektromobilität und Energiespeicherung. Die Politik spielt eine Schlüsselrolle bei der Gestaltung von Rahmenbedingungen, die die Innovation, Produktion und Nutzung von Batterien vorantreiben. Durch gezielte Förderprogramme, Investitionsanreize und Forschungsförderung unterstützen Regierungen weltweit die Entwicklung fortschrittlicher Batterietechnologien. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, Technologiebarrieren zu überwinden, Kosten zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Industrien zu stärken. Hier sind insbesondere die Förderinitiativen der Bundesministerien und die „Forschungsfabrik Batterie“ sowie Förderprogramme der EU im Rahmen von Horizon Europe zu nennen.



**Ökonomische Anreize** spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle, um einen nachhaltigen Batterieeinsatz zu fördern. Subventionen für den Kauf von Elektrofahrzeugen und die Installation von Ladeinfrastruktur sowie steuerliche Anreize für die Herstellung und den Einsatz von Batterien aus erneuerbaren Energien tragen dazu bei, die Markteinführung zu beschleunigen und die Akzeptanz bei Verbrauchern und Unternehmen zu erhöhen. Diese Anreize sollen nicht nur die Umstellung auf saubere Energiesysteme beschleunigen, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft steigern und Arbeitsplätze schaffen.



**Künftige regulatorische Entwicklungen** könnten darauf abzielen, Standards für Batterieherstellung, Recycling und Sicherheit zu harmonisieren und zu verschärfen. Eine klare Regulierung ist entscheidend, um Umweltauswirkungen zu minimieren, Sicherheitsstandards zu gewährleisten und den fairen Wettbewerb zu fördern. Hier hat die Batterieverordnung der EU bereits weitreichende Vorgaben zur Fertigung und zum Recycling von Batterien gemacht, welche in den nächsten Jahren nach und nach Inkrafttreten werden. Insgesamt sind politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen wesentlich für die Skalierung und nachhaltige Nutzung von Batterietechnologien. Durch eine kluge Politikgestaltung und gezielte wirtschaftliche Anreize können die Herausforderungen der Elektromobilität gemeistert und die Vision einer sauberen, energieeffizienten Zukunft Realität werden.





# Was bringt die Zukunft für die Batterietechnik?

Die Zukunft der Batterietechnik verspricht eine Fülle von technologischen Innovationen, die darauf abzielen, Leistung, Sicherheit und Nachhaltigkeit weiter zu verbessern. Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt auf der Erhöhung der Energiedichte und der Verlängerung der Lebensdauer von Batterien. Fortschritte in der Materialwissenschaft könnten zu neuen Batterietypen führen, die leichter, leistungsfähiger und kostengünstiger sind. Insbesondere Festkörperbatterien gelten als vielversprechende Technologie, die höhere Energiedichten bietet und die Sicherheit verbessert, indem sie auf flüssige Elektrolyte verzichtet. Aber auch Natrium-Ionen-Batterien könnten durch ihre ökologischen Vorteile einen wichtigen Stellenwert erlangen. Nachhaltigkeit wird auch in der Batterietechnik zunehmend zu einem zentralen Thema. Hersteller arbeiten an umweltfreundlicheren Produktionsprozessen und entwickeln Recyclingtechnologien, um wertvolle Materialien wie Lithium, Kobalt und Nickel aus alten Batterien zurückzugewinnen.

Die Integration von Kreislaufwirtschaftsprinzipien wird entscheidend sein, um die Abhängigkeit von endlichen Ressourcen zu verringern und die Umweltbelastung zu minimieren. Für Akteure in der Batterietechnik bieten sich mehrere Handlungsempfehlungen an. Investitionen in Forschung und Entwicklung sind unerlässlich, um technologische Fortschritte voranzutreiben und die Marktfähigkeit neuer Batteriekonzepte zu verbessern. Unternehmen sollten verstärkt auf Nachhaltigkeit setzen, indem sie transparente Lieferketten sicherstellen und sich auf das Recycling und die Wiederverwendung von Batteriematerialien konzentrieren. Regierungen können durch Förderprogramme und regulatorische Anreize schaffen, um Innovationen zu fördern und die Entwicklung umweltfreundlicher Batterietechnologien voranzutreiben.

Insgesamt zeigt die Zukunft der Batterietechnik ein vielversprechendes Bild, das durch technologische Innovationen und einen starken Fokus auf Nachhaltigkeit geprägt ist. Die richtigen Maßnahmen und Investitionen könnten dazu beitragen, die Elektromobilität und die Integration erneuerbarer Energien weiter voranzutreiben und eine nachhaltige Energiezukunft zu gestalten.



# Fazit

Durch die Möglichkeit zur direkten Nutzung von Strom aus nachhaltigen Energiequellen, weisen Elektrofahrzeuge enorme Potenziale zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit zum Beitrag zur Energiewende auf. Obwohl für die Herstellung der notwendigen Batterien zunächst mehr Ressourcen benötigt werden und mehr Emissionen entstehen als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, wird dies durch die verminderten Emissionen in der Nutzungsphase des Fahrzeugs wieder ausgeglichen. Ab wie vielen Kilometern ein Elektrofahrzeug umweltfreundlicher ist, hängt dabei stark von den getroffenen Grundannahmen zur Batterieproduktion und dem Strommix ab. Außerdem kann durch das Batterierecycling und die verlängerte Nutzung der Batterie in einer Zweitnutzungsanwendung eine zusätzliche Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen herbeigeführt werden. Sowohl in der Materialauswahl als auch in der Produktion weisen aktuelle Trends klar in Richtung Emissionsreduzierung. Auch aus politischer Sicht ist die Förderung der Batteriewertschöpfungskette in Europa ein wichtiges Anliegen und insbesondere durch die Batterieverordnung der EU werden wichtige Grundlagen der Kreislaufwirtschaft für Batterien in Europa gesetzt.



# Weiterführende Materialien

## Anhang: Glossar der Fachbegriffe

<b>BMS</b>	Batteriemanagementsystem
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>LFP</b>	Lithium-Eisen-Phosphat
<b>Li</b>	Lithium
<b>NiMH</b>	Nickel-Metallhydrid-Batterien
<b>NMC</b>	Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>SEI</b>	Solid-Electrolyte-Interface, Deckschicht auf Anode
<b>V2H</b>	Vehicle-to-Home
<b>V2G</b>	Vehicle-to-Grid

## Quellenverzeichnis, weiterführende Literatur und Links

<https://link.springer.com/>  
<https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/>  
<https://battery-charts.de/>  
<https://mobility-charts.de/>  
<https://www.bmbf.de/>  
<https://www.batteriegesetz.de/>  
<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2023/abt-roadmap.pdf>  
[https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2023/Fraunhofer-ISI\\_LIB-Roadmap-2023.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2023/Fraunhofer-ISI_LIB-Roadmap-2023.pdf)  
<https://pubs.acs.org/>  
<https://www.vdi.de/>  
<https://www.sciencedirect.com/>  
<https://www.mdpi.com/>

# Autoren, das CARL, die Forschungsinitiative

## Autor: Mark Junker

Mark Junker konzentriert sich seit 2019 als wissenschaftlicher Mitarbeiter auf das Thema Energiespeichersysteme am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen. Derzeit leitet er die Abteilung für Netzintegration von Batterien und Speichersystemanalyse. Mit einem Hintergrund im Maschinenbau machte er 2018 seinen Master-Abschluss im Bereich der Verfahrenstechnik an der RWTH Aachen. Seine Forschungsaktivitäten drehen sich um Lithium-Ionen-Batterien, wobei der Schwerpunkt auf Modellierung, Modellparametrierung und Second Life Batterien liegt. Darüber hinaus übernahm er die operative Koordination des 2020 gestarteten und vom BMBF geförderten Kompetenzcluster für Batterienutzungskonzepte.



## Autor: Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer

Dr. Dirk Uwe Sauer studierte Physik an der TH Darmstadt und arbeitete von 1992 bis 2003 beim Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg. Im Jahr 2003 wurde Dr. Sauer als Juniorprofessor an der RWTH Aachen eingestellt für das Lehr- und Forschungsgebiet „Elektrochemische Energiespeicherung und Speichersystemtechnik“ und 2009 bzw. 2012 als Univ.-Professor bzw. als Lehrstuhlinhaber ebendort berufen. Die Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit den Themen Batterie- und Energiespeichersysteme für mobile und stationäre Anwendungen in allen Facetten. Seit Mitte 2022 ist er Gründungsdirektor des Forschungszentrum „Center for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction for Electrochemical and Power Electronic Systems (CARL)“. Dr. Sauer ist u. a. Mitglied des Direktoriums des wissenschaftsbasierten Politikberatungsprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (davon 7 Jahre als Vorsitzender), das von den nationalen Wissenschaftsakademien acatech, Leopoldina und Union der Wissenschaftsakademien getragen wird. Er leitet als Koordinator das BMBF-Kompetenzcluster Batterienutzungskonzepte im Rahmen des Dachkonzepts „Batteriezellfertigung“. Dr. Sauer wurde 2020 mit dem Lehrpreis der RWTH ausgezeichnet und hat vier Start-ups mitgegründet.



### Institution: CARL

Wir sind davon überzeugt, dass wirksamer Klimaschutz nur mit einer weitreichenden Elektrifizierung in Mobilität, Industrie, Gebäuden und Energieversorgungen gelingen kann. Die Speicherung in Batterien und Wandlung durch leistungselektronische Systeme von elektrischer Energie ist dabei eine notwendige Voraussetzung von zentraler Bedeutung. Im Center for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction of Electrochemical and Power Electronic Systems (CARL) erforschen wir Verfahren und Methoden, die es ermöglichen, Zuverlässigkeit und Lebensdauer neuer Materialien und Systeme in kurzer Zeit mit hoher Genauigkeit vorherzusagen. Damit werden wir Innovations- und Markteinführungszyklen beschleunigen und durch Erhöhung der Nutzungsdauern Kosten senken sowie Energie- und Materialressourcen schonen.

### Forschungscluster: greenBattNutzung

Die Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus (greenBattNutzung) ist Teil des Dachkonzepts des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Batterieforschung und besteht aus den Kompetenzclustern Recycling & Grüne Batterie (greenBatt) & Batterienutzungskonzepte (BattNutzung). In beiden Clustern arbeiten 55 Institute bzw. Forschungsstellen in 29 Forschungsprojekten zusammen. Die Mission des Clusters BattNutzung besteht dabei in der Entwicklung, Gestaltung und Anwendung neuer Konzepte zur Batteriesystembewertung, welche experimentelle Ergebnisse und Erkenntnisse auf Zellebene über ein Systemverständnis mit der Ebene batterietechnischer Anforderung verbindet. Gleichzeitig forscht das Kompetenzcluster greenBatt an der Entwicklung, Gestaltung und Anwendung innovativer Technologien, Methoden und Werkzeuge für einen energie- und materialeffizienten Batterielebenszyklus und geschlossene Stoff- und Materialkreisläufe mit besonderem Fokus auf das Batterierecycling.



# Verti Versicherung AG

Rheinstraße 7A, 14513 Teltow  
Amtsgericht Potsdam, HRB 9828

USt-IdNr.: DE198450959  
VersSt-Nr.: 804/V90804000186

## **Vorstand**

Monica Garcia (Vorsitzende)  
Dr. Felix Ludwig  
Frank Senge

## **Vorsitzende des Aufsichtsrates**

Mariel von Schumann

## **Kontakt**

030 890 003 003  
marketing@verti.de  
Auflage / Stand: 01.07.2024  
Alle Rechte vorbehalten

