


VDI-Analyse der CO₂^{äq}-Emissionen von Pkw mit verschiedenen Antriebssystemen

A photograph of a woman in a light-colored top and blue jeans standing at an electric vehicle charging station. She is looking down at a smartphone in her hand. The charging station is white and green, with a charging cable plugged into the car. The background is a blurred outdoor setting with green trees and a clear sky.

**Wann wird
Autofahren
grün?**

**VDI Factsheet - Die wichtigsten Studien-
ergebnisse und Handlungsempfehlungen**

Bild: © Simonskar/Gettyimages.com

Erst eine grüne Batterie macht E-Mobilität klimafreundlich

Studiendesign

Die aktuellen ökologischen und politischen Anforderungen erfordern eine Überprüfung aller verfügbaren Möglichkeiten, um den Verkehrssektor nachhaltiger zu gestalten. Es ist eine enorme Herausforderung der sich der Straßenverkehr stellen muss, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Was ist aber bei der Bewältigung dieser Aufgabe die richtige Strategie bei der Wahl der Antriebsart und dem zugehörigen Energieträger? Sind es rein elektrifizierte Antriebe, sind es hybride Antriebe (Elektro- und Verbrennungsmotor in unterschiedlichen Ausprägungen) oder ist es der Verbrennungsmotor, wenn er mit alternativen Kraftstoffen betrieben wird?

Um diesen komplexen Sachverhalt und die Wirkungen der unterschiedlichen Antriebssysteme auf das Klima entsprechend bewerten zu können, hat der VDI eine neue Ökobilanzanalyse durchgeführt.

Durchgeführt vom interdisziplinären Expertengremium Antriebe des VDI-Fachbereichs Kraftfahrzeugtechnik in der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik und unterstützt durch das Karlsruhe Institute of Technologie (KIT) wurden die Methodik und die Ergebnisse einem Reviewverfahren durch das Paul Scherrer Institut (PSI) unterzogen. Bei der Erstellung wurden als Maßstab die DIN EN ISO 14040 sowie DIN EN ISO 14044 herangezogen. Als Datenbank wurde ecoinvent v.3.8 verwendet.

Die VDI-Ökobilanzanalyse betrachtet den Umwelteinfluss von verschiedenen Pkw-Antriebskonzepten am Beispiel des Anwendungsfalls von produzierten Kompaktklassefahrzeugen im Jahr 2021, z. B. VW ID3, Ford Focus, VW Golf oder Toyota Corolla Hybrid. Batterieelektrische Antriebe, Hybridantriebe in unterschiedlichen Ausgestaltungsformen und rein verbrennungsmotorische Konzepte werden analysiert und verglichen. Der Treibhausgas-Emissionsvergleich erfolgt unter Berücksichtigung der Fahrzeugproduktion im Jahr 2021 und Nutzung der Fahrzeuge bis zum Jahr 2035 mit einer Referenzlaufzeit von 200.000 km sowie der entsprechenden Netto-Stromerzeugung in diesem Zeitraum (siehe Bild 1).

Die technologiebasierte Modellierung der Ökobilanzanalyse basiert auf einer detaillierten Abbildung der Antriebstechnologien. Der Schwerpunkt liegt auf einer Analyse des Bilanzraums Deutschland. Der Vergleich der verschiedenen Antriebsstrangkonzepte basiert auf der Grundlage einer umfangreichen Berücksichtigung von vielfältigen Einflüssen (z. B. Materialien (auch Rohstoffe), Prozesse, Produktionsorte). Aufgrund bislang fehlender großmaßstäblicher Daten konnte der Einfluss des Batterierecyclings nur auf der Potenzialseite berücksichtigt werden.

Die Studie nutzt unterschiedliche Nutzungsszenarien (z. B. WLTP, EcoTest) und verwendet durchgängig die zwei energetischen Berechnungsgrundlagen Mittelwert- und Marginalansatz. Der Mittelwertansatz ist die übliche Berechnungsgrundlage und liefert die mittlere CO₂-Emission von allen vorhandenen elektrischen Verbrauchern im Sinne eines arithmetischen Mittelwerts über feste Zeiträume. Er geht davon aus, dass immer ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien verfügbar ist. Der Marginalansatz als weitere Berechnungsgrundlage zeigt das mögliche CO₂-Einsparpotenzial bei Abschaltung eines elektrischen Verbrauchers beziehungsweise die CO₂-Zusatzemissionen beim Hinzufügen eines weiteren elektrischen Verbrauchers, z. B. eines neu zugelassenen Elektrofahrzeugs. Hierbei die Annahme, dass nicht immer ausreichend Strom aus regenerativen Energien vorhanden ist, sodass zusätzlicher Strom aus fossilen Energieträgern gewonnen werden muss, um den Bedarf zu decken.

Netto-Stromerzeugung nach AGEB und KN2045

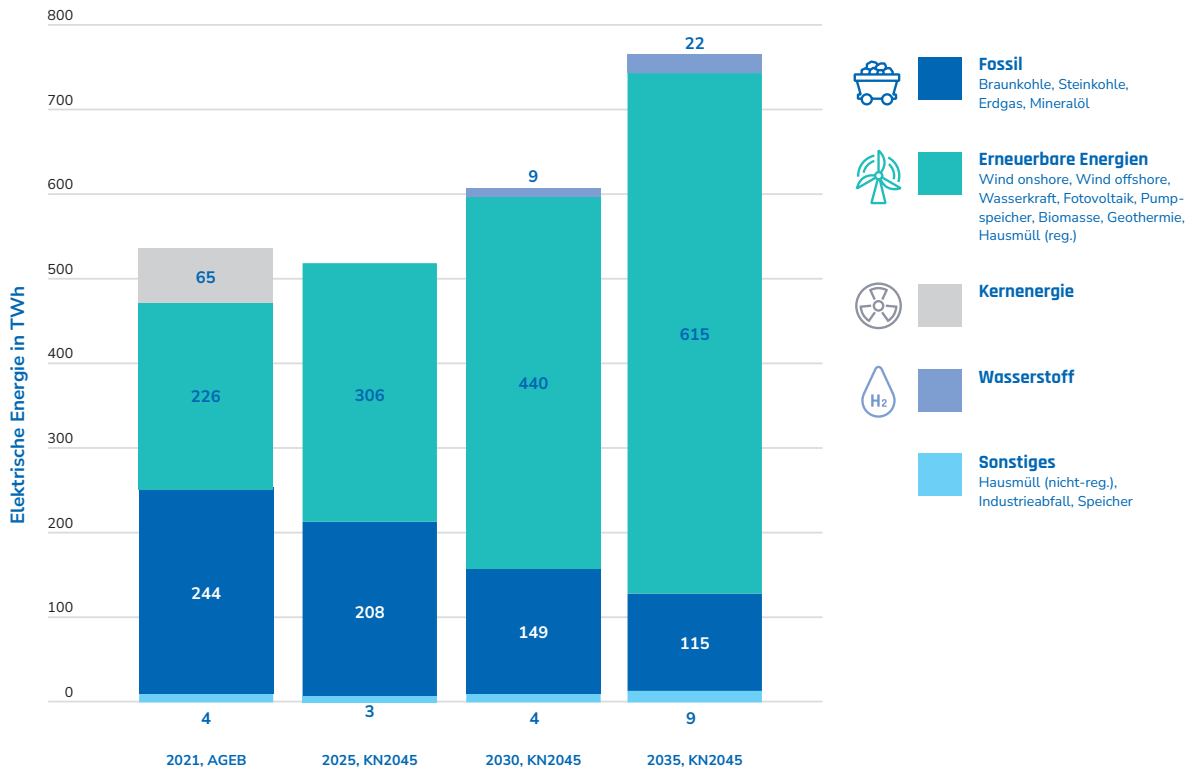


Bild 1. Entwicklung der Netto-Stromerzeugung in Deutschland

Kernergebnisse

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Studie sind die Ergebnisse über die Treibhausgas(THG)-Emissionen, die bei der Herstellung eines Pkw entstehen. Hier entfällt beim Elektroauto immer noch über die Hälfte der CO₂-Emissionen auf die Produktion des Antriebsstrangs. Bei einem Elektroauto mit einer Akkukapazität von 82 kWh sind dies 10,12 t CO_{2äq}. Bei einem Verbrenner mit Benzin sind es lediglich 1,21 t CO_{2äq} (siehe Bild 2).

Produktionsbedingte THG-Emissionen

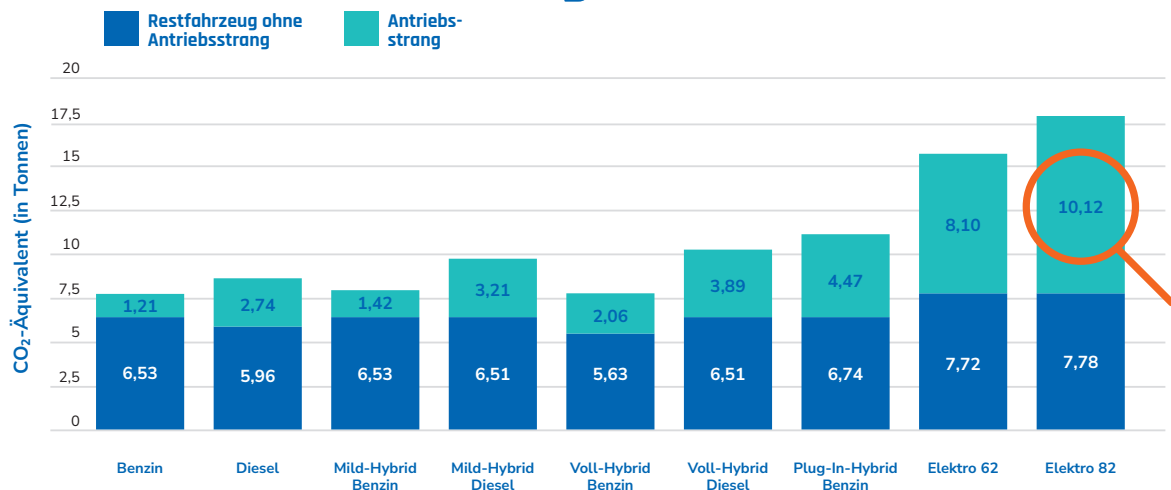


Bild 2. Treibhausgasemissionen bei der Produktion von Pkw

Wird der Blick auf die Produktion des Antriebsstrangs beim Elektroauto noch weiter geschärft, werden Schwerpunkte deutlich sichtbar. Die Produktion der Batterie ist mit 83 % (8,37 t CO_{2äq}) der Hauptverursacher für die hohen CO₂-Emissionen bei der Produktion (siehe Bild 3). Die weiteren Komponenten spielen eine untergeordnete Rolle.

THG-Emissionen bei der Produktion eines BEV-Antriebsstrangs (82 kWh)

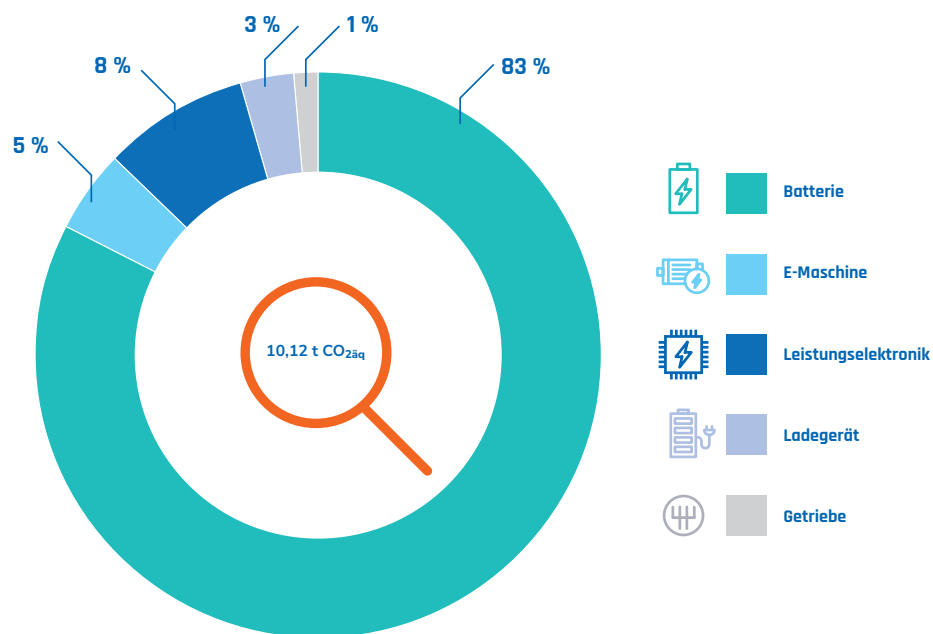


Bild 3. Darstellung der produktionsbedingten Treibhausgasemissionen eines batterieelektrischen Antriebsstrangs

Das Elektroauto startet folglich mit einem produktionsbedingten CO₂-Rucksack, den es über die Nutzungsphase wieder „einfahren“ muss. Es ist im Rahmen der Studie aufgezeigt worden, dass Fahrprofil und Energieträger je nach Antriebskonzept entscheidenden Einfluss auf die betriebsbedingten THG-Emissionen ausüben.

Nach einer **angenommenen Laufleistung von 200.000 Kilometern** bei Verwendung des Mittelwertansatzes und Verwendung des WLTP-Szenarios **schneiden das betrachtete Elektroauto** mit einer Akkukapazität vom 62 kWh (24,2 t CO_{2äq}) und der **Plug-in-Hybrid** (24,8 t CO_{2äq}) **aus der Kompaktklasse bei der Klimabilanz am besten ab.** Diesel (33 t CO_{2äq}) und Benziner (37,1 t CO_{2äq}) folgen (siehe Bild 4). **Der Vorteil des Elektroautos stellt sich bei 90.000 km ein.** Ab diesem Punkt ist das Elektroauto klimafreundlicher als der konventionelle Verbrenner mit Benzin.

In Abhängigkeit der unterschiedlichen Randbedingungen der Bilanzanalyse, z. B. dem bei der Bilanzierung herangezogenen Ansatz der Energie (Mittelwertansatz und Marginalansatz) oder den unterschiedlichen Fahrprofilen (WLTP, Kurzstrecke usw.), ergibt sich eine Spreizung der resultierenden Bilanzergebnisse.

Auf der Basis des mittleren, sogenannten WLTP-Energiebedarfs der Fahrzeuge ergeben sich bei der Verwendung des Mittelwertansatzes bei einem Elektroauto mit einer Akkukapazität von 62 kWh THG-Emissionen in Höhe von 24,2 t CO_{2äq}. Bei Berücksichtigung des Marginalstromansatzes resultiert je nach Betrachtung ein Wert von ca. 33,8 t CO_{2äq}. Wird das Fahrzeug mit Solarstrom geladen, ergeben sich sogar nur 19,1 t CO_{2äq}. Beim Fahrprofil Autobahn liegen die Werte bei 27,5 t CO_{2äq} beim Mittelwertansatz und 40,8 t CO_{2äq} bei Berücksichtigung des Marginalstromansatzes.

Szenario Nutzung, WLTP-Betrieb

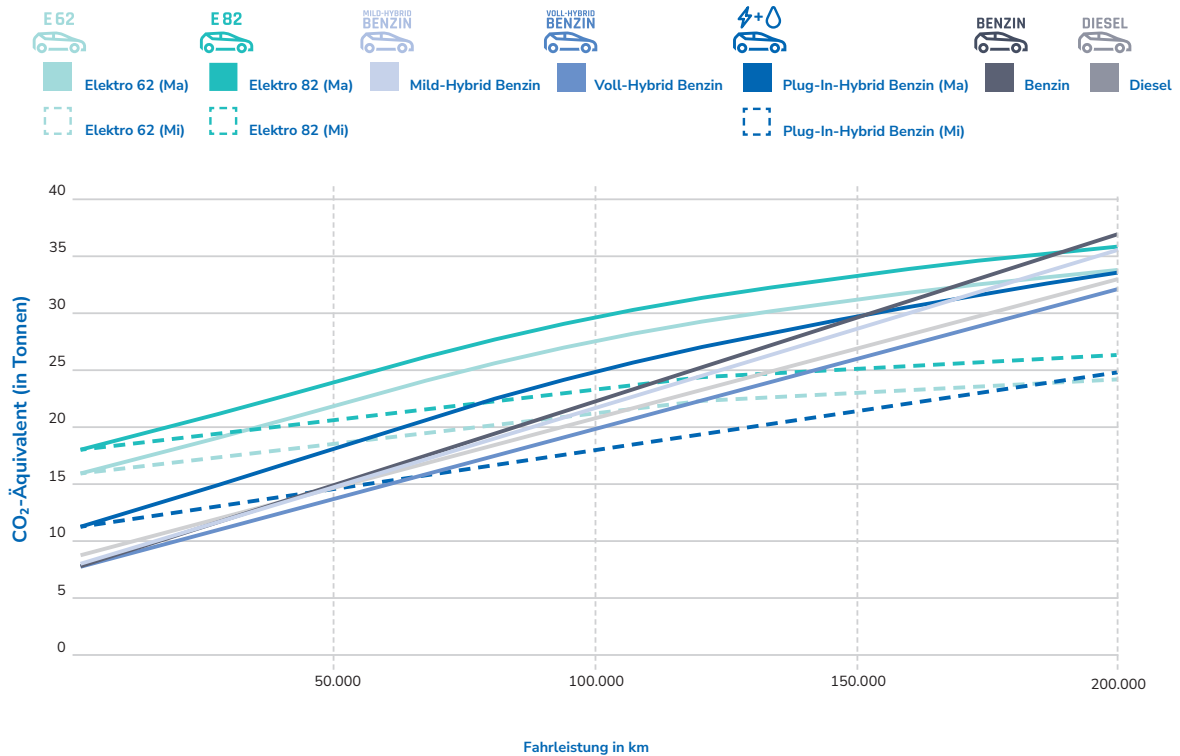


Bild 4. Darstellung der kumulativen Treibhausgasemissionen der unterschiedliche Antriebskonzepte auf Basis der WLTP-Verbräuche (für BEV mit 62-kWh- bzw. 82-kWh-Batterie sowie PHEV-g mit Marginalansatz (Ma) und Mittelwertansatz (Mi))

Bei Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen ergeben sich THG-Emissionen zwischen 24,8 t CO_{2äq} (WLTP, Mittelwertansatz) und 46,0 t CO_{2äq} (EcoTest im Hybridmodus) je nach Analyseansatz und Anwendungsprofil.

Bei Diesel- und Benzin- sowie Hybridfahrzeugen ergeben sich THG-Emissionen zwischen 25,1 t CO_{2äq} (FHEV-g) und 43,6 t CO_{2äq} (ICEV-g, Kurzstrecke) je nach Technologieausführungen und Fahrprofilen.

Die größte Bandbreite an Ergebnissen weist das Plug-in-Hybrid-Fahrzeug (PHEV-g) auf. Einsatzfall und Analysemethoden führen zu einer großen Bandbreite von 24,8 t CO_{2äq} bis 46,0 t CO_{2äq}.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen in vielen Bereichen noch einen erheblichen Handlungsbedarf. Um in Zukunft eine klimafreundliche Mobilität zu gewährleisten, formuliert der VDI sieben zentrale Handlungsempfehlungen für Politik, Industrie und Anwender.

Handlungsempfehlungen für Deutschland

Ohne grünen Strom keine grüne E-Mobilität.

- Wir brauchen in Deutschland den Ausbau der erneuerbaren Energien auch für eine klimafreundlichere Mobilität. Allein der Umstieg auf Elektroautos und Hybridfahrzeuge wird nicht ausreichen, wenn der Strom „dreckig“ produziert wird. Der Ausbau von Fotovoltaik und Windkraft ist wichtig und wird die Klimabilanz der Elektroautos in der Nutzungsphase spürbar verbessern.
- Die Defossilisierung der elektrischen Energieversorgung muss bei gleichzeitigem Ausbau der regenerativen Erzeugung der elektrischen Energie vorangetrieben werden.
- Die Studie zeigt erheblich erhöhte THG-Emissionen für heute neu in den Markt kommende Elektroautos (auch Plug-in-Hybride), die im Marginalansatz im System zusätzliche elektrische Verbraucher darstellen. Der Ausbau von Fotovoltaik und Windkraft sowie der erforderlichen Netze muss daher ganz erheblich steigen, um der anvisierten Zahl rein batterieelektrischer Fahrzeuge zu genügen.

Erst grüne Batterien ermöglichen grüne E-Mobilität.

- Um die THG-Emissionen, die bei der Batterieproduktion entstehen, so gering wie möglich zu halten, muss die Batterieproduktion für E-Fahrzeuge mit regenerativer Energie erfolgen.
- Die Batterieproduktion für Elektroautos muss zwingend mit regenerativer elektrischer Energie erfolgen, um THG-Emission bei der Produktion gering zu halten. Die Studie zeigt, dass die THG-Emissionen von batterieelektrischen Fahrzeugen entscheidend durch die Produktion der Batterien bestimmt wird. Hier bei spielt auch der jeweilige Produktionsort eine entscheidende Rolle.

Standort Deutschland stärken: Batterien müssen in Deutschland und Europa mit erneuerbarem Strom nachhaltig produziert und recycelt werden.

- Eine Batterieproduktion in Deutschland und europäischen Ländern mit hohem erneuerbarem Energieanteil sorgt neben einer europäischen Wertschöpfung für eine bessere CO₂-Bilanz der Autos.
- Die Studie zeigt, dass gerade Batterien aus China hohe THG-Emissionen bei der Produktion aufweisen. Aber auch Produktionsstandorte in Europa mit einem hohen fossilen Energieanteil weisen bei der Produktion hohe THG-Emissionen auf.
- Ein Wertstoffkreislauf basierend auf einer guten Recyclingquote bei der Batterie schafft bei der Rohstoffverfügbarkeit eine gewisse Unabhängigkeit und wirkt sich positiv auf die THG-Emissionen aus.

E-Fuels sind ein wichtiger Technologiebaustein.

- Wir leben in einer Zeit der Transformation. In dieser sind E-Fuels ein wichtiger Technologiebaustein für eine klimaneutrale Mobilität der Zukunft.
- Zur Erreichung der deutschen und europäischen Klimaziele im Verkehrssektor ist die Nutzung von klimaneutralen Kraftstoffen für die Bestandsflotte unabdingbar. Hierfür müssen umgehend die regulatorischen Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit eine entsprechende Skalierung der Technik erfolgen kann.

Plug-in-Hybride leisten bei hohem elektrischen Fahranteil einen positiven Beitrag.

- Um möglichst emissionsarm zu fahren, müssen Autofahrende auf den bestimmungsgemäßen Betrieb von Plug-in-Hybriden achten. Das bedeutet, sie müssen ihre Plug-in-Hybride prioritär und regelmäßig elektrisch laden, um einen hohen elektrischen Fahranteil zu erreichen.
- Es muss zwingend ein Augenmerk auf den bestimmungsgemäßen Betrieb von Plug-in-Hybriden gerichtet werden.
- Die Studie zeigt, dass Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge bei unterschiedlichen Nutzungsszenarien (EcoTest oder WLTP) entweder Fluch oder Segen bezüglich der THG-Emissionen sein können. Produktionsbedingte Mehr-THG-Emissionen können bei bestimmungsgemäßer Nutzung der Fahrzeuge mehr als ausgeglichen werden. Bei nicht bestimmungsgemäßer Nutzung zeigt die Studie die höchsten THG-Emissionen der verglichenen Antriebsarten.

Eine neue leichtere Fahrzeugklasse M0 bietet für den urbanen Bereich zusätzliches Potenzial.

- Eine neu zu schaffende Elektro-Kleinfahrzeug-Klasse M0 für den urbanen Bereich mit entsprechend kleinen Batterien, geringem Gewicht und geringer Stellfläche, aber keinen Abstrichen bei der Sicherheit, kann viele Mobilitätsbedarfe erfüllen.
- Die Studie zeigt, dass kleine und schnellladefähige Batterien die THG-Emissionen batterieelektrischer Fahrzeuge verbessern. Der Gestaltungsspielraum und damit das Marktpotenzial für diese kleinen Elektroautos kann wegen der europäischen Gesetzgebung derzeit nicht erfüllt werden.

Die Forschung und Entwicklung von Batterierecycling muss weiter vorangetrieben und zielgerichtet gefördert werden.

- Ein Teil der Wertschöpfung soll in Deutschland bleiben, um den Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort zu stärken.
- Die Studie sieht neben bereits erfolgten regulatorischen Vorgaben einen verstärkten Handlungsbedarf beim Recycling der Traktionsbatterien von Elektroautos, insbesondere bei den Themen Forschung und Entwicklung sowie einer Skalierung auf einen industriellen Maßstab. Mit Blick auf Materialbedarf und Materialverfügbarkeit wird dem Thema Recycling zukünftig eine immer wichtigere Rolle zukommen.

Die VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik

Die VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (FVT) bietet mit ihren fünf Fachbereichen die Heimat für Ingenieurinnen und Ingenieure der unterschiedlichsten Fachrichtungen rund um die Verkehrsträger Straße, Schiene, Luft und Wasser. In einem aktiven Zusammenspiel mit den Arbeitskreisen der VDI-Bezirksvereine, den Young Engineers sowie den weiteren VDI-Fachgesellschaften ist die VDI-FVT national und international mit weiteren Kooperationspartnern vernetzt. Die VDI-FVT (www.vdi.de/fvt) hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Wahrnehmung des Ingenieurberufs zu stärken und den VDI als technisch-wissenschaftlichen Meinungsführer in Fachwelt, Politik und Gesellschaft verstärkt zu etablieren. Dabei gilt es, das Zusammenwirken der unterschiedlichen Mobilitätsbereiche zu forcieren und fachliche Impulse zu geben sowie Perspektiven für Querschnittsthemen rund um die Bereiche „Mensch und Mobilität“ sowie „Transportmittel und Infrastruktur“ zu entwickeln.

Der VDI

Gestalter der Zukunft

Seit mehr als 165 Jahren gibt der VDI wichtige Impulse für den technischen Fortschritt. Mit seiner einzigartigen Community und seiner enormen Vielfalt ist er Gestalter, Wissensmultiplikator, drittgrößter technischer Regelsetzer und Vermittler zwischen Technik und Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Er motiviert Menschen, die Grenzen des Möglichen zu verschieben, setzt Standards für nachhaltige Innovationen und leistet einen wichtigen Beitrag, um Fortschritt und Wohlstand in Deutschland zu sichern. Der VDI gestaltet die Welt von morgen – als Schnittstelle zwischen Ingenieurinnen und Ingenieuren, Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. In seinem einzigartigen multidisziplinären Netzwerk mit etwa 135.000 Mitgliedern bündelt er das Wissen und die Kompetenzen, die nötig sind, um den Weg in die Zukunft zu gestalten.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik
Dipl.-Ing. Christof Kerkhoff
fvt@vdi.de
www.vdi.de

Hier erhalten Sie die komplette VDI-Studie:

