



# Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen



VDI-Studie  
Oktober 2020



# Management Summary

In dieser Studie zur Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen wird die Methodik der Umweltbilanzierung mit Blick auf den begleitenden Einsatz in der Entwicklung transparent beschrieben und die Datenquellen dargelegt sowie Sensitivitäten betrachtet.

Diese Studie ist eine vergleichende Umweltbilanzierung verschiedener Antriebssysteme für Pkw-Anwendungen. Sie enthält keine Kosteninformationen, weder für die Produkte noch deren Entwicklung oder notwendiger Infrastrukturvoraussetzungen. Basierend auf dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen werden die getroffenen Annahmen dargelegt, die verwendeten Daten aufgezeigt und Ergebnisse vorgestellt.

Nicht Teil dieser Studie sind Hybrid-Antriebe, weder Vollhybride noch Plug-In-Hybride. Es ist geplant, die Studie in laufenden Arbeiten fortzuführen und dann entsprechend zu erweitern.

Die zugrunde liegenden Daten setzen sich zusammen aus:

- Daten, die von am VDI-Fachbeirat „Antrieb- und Energiemanagement“ beteiligten Mitgliedern bereitgestellt wurden
- Daten aus vorherigen Studien des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
- Daten aus öffentlichen Publikationen
- Daten aus der Datenbank „ecoinvent 3.5“
- Daten aus öffentlich zugänglichen Ersatzteildatenbanken

Je Fahrzeug werden bei einer Berechnung knapp 11.000 Materialien in 1.938 sogenannten Produktions- und Nutzungsflüssen bewertet.

Analysiert wurden:

- ein signifikanter Einfluss der verwendeten Batteriegröße u. a. auf die bei der Produktion emittierten CO<sub>2</sub>-Äquivalente, die den wesentlichen Teil der Cradle-to-Cradle-CO<sub>2</sub>-Äquivalente eines batterieelektrischen Fahrzeugs bedingen
- ein signifikanterer Einfluss der Effizienz der Antriebe, vor allem bei dieselmotorischen Antrieben auf die in der Nutzung emittierten CO<sub>2</sub>-Äquiva-

lente, die bei verbrennungsmotorischen Konzepten dominant sind

- ein entscheidender Einfluss des sogenannten „CO<sub>2</sub>-Rucksacks“ der Energiequelle bei allen Antriebskonzepten (Dieselmotor, Elektromotor mit Batterie oder Brennstoffzelle)

Nicht berücksichtigt wurden:

- Ladeverluste
- Infrastruktur

Angedeutet, aber noch nicht detailliert ausgeführt wurden:

- Abweichungen vom Realverbrauch durch nutzerspezifisches Verhalten

Kernaussagen:

- Alle Fahrzeugkonzepte haben das Potenzial, signifikant zur CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Mobilität beizutragen.
- In allen Fällen müssen Produktherstellung und -nutzung zusammen mit den zur Verfügung stehenden Energiequellen betrachtet werden. Wenn die Energieträger nicht von ihrem CO<sub>2</sub>-Rucksack befreit werden, kann keine der Technologien helfen. Wenn die Energieträger auf erneuerbarer Basis gewonnen werden, können alle Technologien helfen, die Umweltbilanz zu verbessern.
- Alle Technologien können an unterschiedlichen Stellen und in unterschiedlichen Anwendungen auf das Ziel hin Unterstützung leisten, die Mobilität CO<sub>2</sub>-neutral zu gestalten.
- Ein komplementäres Miteinander der Technologien ist die einzige Chance (z. B. mit Blick auf die Bestandsflotte), die CO<sub>2</sub>-Ziele für 2030 zu erreichen.
- Weitere Wirkungskategorien (z. B. Humantoxizität, Versäuerungspotenzial) dürfen nicht ausgeblendet werden.
- Umweltbilanzierung ist ein wesentliches interdisziplinäres entwicklungsbegleitendes Werkzeug.



# Vorwort

Antriebskonzepte in der Mobilität sind aktuell im Fokus vielfältiger Diskussionen in Politik, Gesellschaft, Wissenschaft und Industrie. In unserem interdisziplinär besetzten Fachbeirat „Antrieb und Energiemanagement“ der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik beschäftigen wir uns deshalb eingehend mit Antriebskonzepten hinsichtlich Ressourcenschonung, geringem CO<sub>2</sub>-Impact und hoher Wirtschaftlichkeit, und damit auch deren Zukunftsfähigkeit.

Um faktenbasiert aufzeigen zu können, wie sich der Status der Antriebssysteme von Pkws heute und in der Zukunft gestaltet, hat der VDI eine entsprechende Studie in Auftrag zu geben.

Wir sind sehr froh darüber, dass das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) die Aufgabe angenommen hat und unter der Leitung von Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch und Dr. Olaf Toedter die VDI-Studie „Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen“ erstellt hat. Die Arbeit wurde durch

regelmäßige Kommentierung und kritische Diskussion unter den Mitgliedern des Fachbeirats Antrieb und Energiemanagement unterstützt.

Diese VDI-Studie betrachtet die CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen in Frage kommenden Antriebssysteme über die gesamte Lebensphase – von der Erzeugung der Rohstoffe über die Produktion und der Nutzungsphase bis zum Recycling. Das Ganze zum Stand 2020 und mit Blick auf das Jahr 2030, in beiden Fällen unter Berücksichtigung eines unterschiedlichen Nutzerverhaltens.

Damit ist diese VDI-Studie mit ihren erarbeiteten Ergebnissen eine geeignete Quelle, um VDI-Mitglieder und die Öffentlichkeit mit neutralen und fachlich fundierten Informationen zu versorgen.

Mein Dank gilt allen verantwortlichen und mitarbeitenden Personen, die diese Studie erarbeitet haben.

Düsseldorf im Oktober 2020



Dr.-Ing. Ralf Marquard  
Vorsitzender des VDI-Fachbeirats „Antrieb und Energiemanagement“ der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik

# Autoren

Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr.-Ing. Olaf Toedter, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Philipp Weber, M. Sc., Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

# Inhalt

Management Summary	1
Vorwort	3
Autoren	4
Inhalt	5
1 Motivation	6
2 Ökobilanz	7
3 Methodische Aufbereitung der LCA	8
3.1 Ökobilanz als V-Modell	8
3.2 Vergleichbarkeit von Ökobilanz-Studien	9
4 VDI-Ökobilanz	11
4.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	11
4.2 Sachbilanz	12
4.3 Energiequellen	16
4.4 Implementierung in openLCA	16
4.5 Ergebnisse	17
5 Zusammenfassung	28
Anhang	30
Abkürzungsverzeichnis	32
Literaturverzeichnis	33

# 1 Motivation

Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist eine Aufgabe, die jeden betrifft. Für Ingenieurinnen und Ingenieure ist es eine Herausforderung, die in einer nach Sektoren getrennten Gesetzeslage hinterlegten Vorgaben in einer sektorübergreifenden Betrachtung ergebnisoptimal umzusetzen. Hierzu müssen im Wesentlichen die Sektoren Mobilität, Industrie und Energie in die Betrachtung einbezogen werden. So wirkt die CO<sub>2</sub>-Reduktion im Sektor Energieversorgung automatisch bei der Produktion von Gütern und damit im Sektor Industrie mit.

In der Vergangenheit wurden viele globale Aufgabenstellungen dadurch gelöst, dass das Problem in ein bisher unbeachtetes Arbeitsfeld verschoben wurde. So wurde die Holzknappheit im Schiffs-, Hausbau und der Hausheizung dadurch entspannt, dass die Kohle als ein Energieträger erschlossen wurde. Die

Begrenztheit der Kohle wiederum wurde durch die Nutzung des Rohöls ersetzt, dessen Produkte eine deutlich höhere Energiedichte aufwiesen. Nicht im Blickfeld hatte man dabei die Nebenwirkungen wie Landschafts- und Grundwasserschäden beim Kohlebergbau oder die gesundheitsschädlichen Emissionen einer Verbrennung von Mineralölprodukten und die erneute Nutzung einer begrenzten Ressource.

Eine Vorgehensweise, ein möglichst ganzheitliches Bild einer Situation zu erlangen, ist die Methode der Umweltbilanzierung. Diese Methodik, die auch Ökobilanz oder in Anlehnung an ihre englischsprachige Bezeichnung Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) genannt wird, erfordert eine Betrachtung eines Produkts inklusive seiner Produktion, seiner Nutzung und seines Recyclings [1].



## 2 Ökobilanz

Der methodische Ansatz der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/DIN EN ISO 14044 [2; 3] umfasst die ganzheitliche Betrachtung von Umweltauswirkungen der gesamten Prozesskette von Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts. In Bild 1 sind die vier Phasen einer Ökobilanz nach [3] zu erkennen.

Dabei werden zunächst Ziel sowie Untersuchungsrahmen definiert (1). Danach werden in der Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) Input- und Outputflüsse nach Massen- und Energieerhaltungsgesetz für das betrachtete System erhoben (2). Auf Basis der Sachbilanz findet die Abschätzung der potenziellen Wirkungen auf die Umwelt statt (3). Die abschließende Auswertung reflektiert die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) in Bezug auf das definierte Ziel auf die

methodische Konsistenz hin. Diese mündet in Schlussfolgerungen zu relevanten Parametern und Empfehlungen.

Die Pfeile zwischen und innerhalb der Phasen weisen auf den iterativen Charakter der Methodik hin. Neben der Prüfung auf Vollständigkeit und diverser Sensitivitätsanalysen beinhaltet die LCA-Methodik daher auch eine möglichst transparente Auflistung der Annahmen und Randbedingungen.

Das Ergebnis einer LCA-Studie kann zum Vergleich unterschiedlicher Produkte für eine vergleichbare Aufgabe, aber auch zur ökologischen Verbesserung von Produkten, also als Entwicklungswerkzeug dienen.

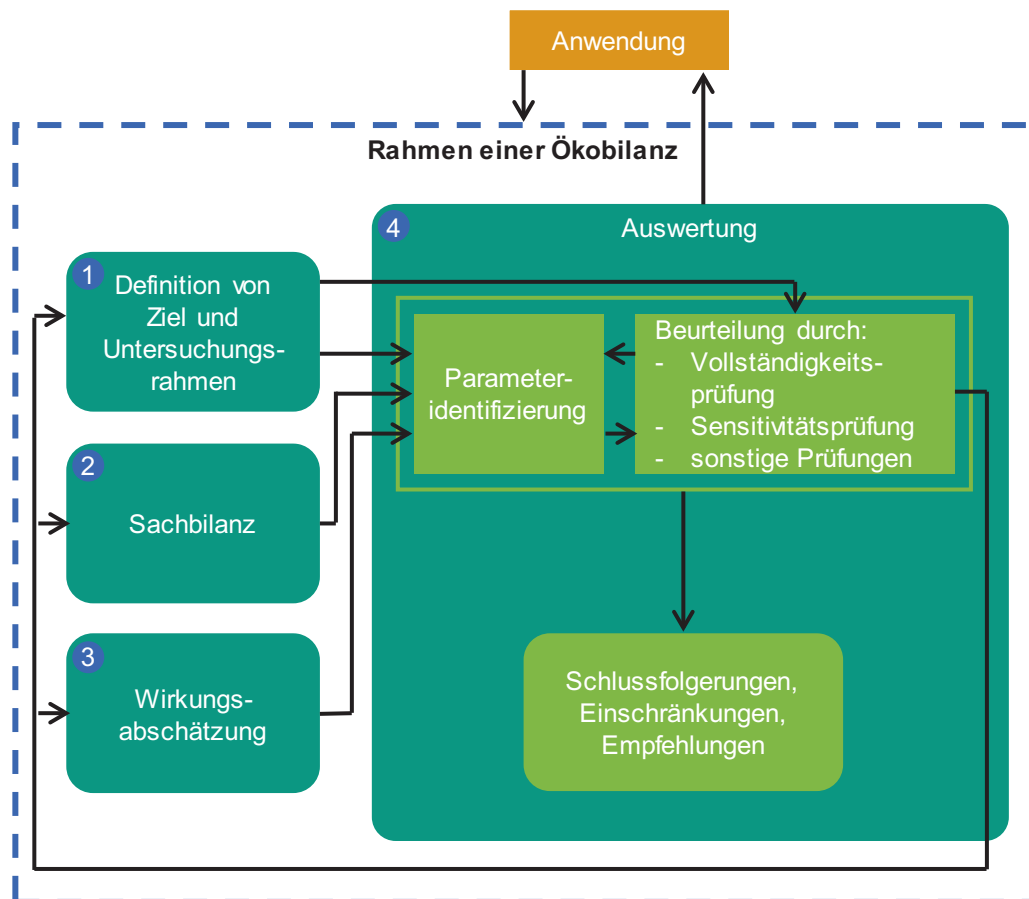


Bild 1. Die vier Phasen einer Ökobilanz nach [3] aus [4]

## 3 Methodische Aufbereitung der LCA

Die ingenieurwissenschaftliche Vorgehensweise bei komplexen Produkten wird vorzugsweise nach dem V-Modell durchgeführt. In der folgenden Beschreibung erfolgt die Verknüpfung der standardisierten Vorgehensweise einer Ökobilanzierung mit dem V-Modell.

### 3.1 Ökobilanz als V-Modell

Beim Vergleich der LCA-Methodik mit dem in der Produktentwicklung etablierten V-Modell nach VDI 2206 [5] ergeben sich Gemeinsamkeiten. In Bild 2 sind die vier Phasen wie zuvor in dunkelgrün zu erkennen.

Den ersten drei Phasen entspricht jeweils ein V, auch Makrozyklus genannt. Wie im ursprünglichen V-Modell werden mit zunehmendem Reifegrad oder zusätzlichen Systemebenen außen weitere Vs hinzugefügt. Die vierte Phase, die Auswertung, findet entsprechend der Verzweigung der LCA-Methodik nach jeder einzelnen Phase statt. Am Ende steht die konkrete

Anwendung der zu erstellenden Studie oder eine weitere Iteration mit erhöhtem Detaillierungsgrad. Dieser nimmt im V von oben nach unten zu, was sich sowohl auf den Übergang vom Gesamtsystem zur Teilfunktion als auch auf die Datenqualität bezieht, siehe Bild 3. Hier sind zu Beginn nur die Masse und der Antriebsenergiebedarf des Personenkraftwagens bekannt, während die Gesamtfahrleistung und weitere Daten aus Sekundärquellen bezogen werden müssen, z. B. aus der Datenbank der Firma ecoinvent. Unsicherheiten in den Ergebnissen können verringert werden, indem exaktere Informationen zu den verwendeten Materialien und deren Massenanteilen, den entsprechenden Fertigungs- und Fügeverfahren der Komponenten sowie den Produktionsstandorten und deren Energiemix bekannt sind. Prinzipiell sind alle dieser Parameter auf Vollständigkeit und Sensitivität zu prüfen. Dabei findet ein Abgleich mit den jeweiligen Anforderungen der entsprechenden Phasen statt. Von besonderem Interesse dieses kombinierten Ansatzes ist die Wechselwirkung zwischen der Anforderungsdefinition zu Beginn und ihrem Einfluss auf das Ergebnis.

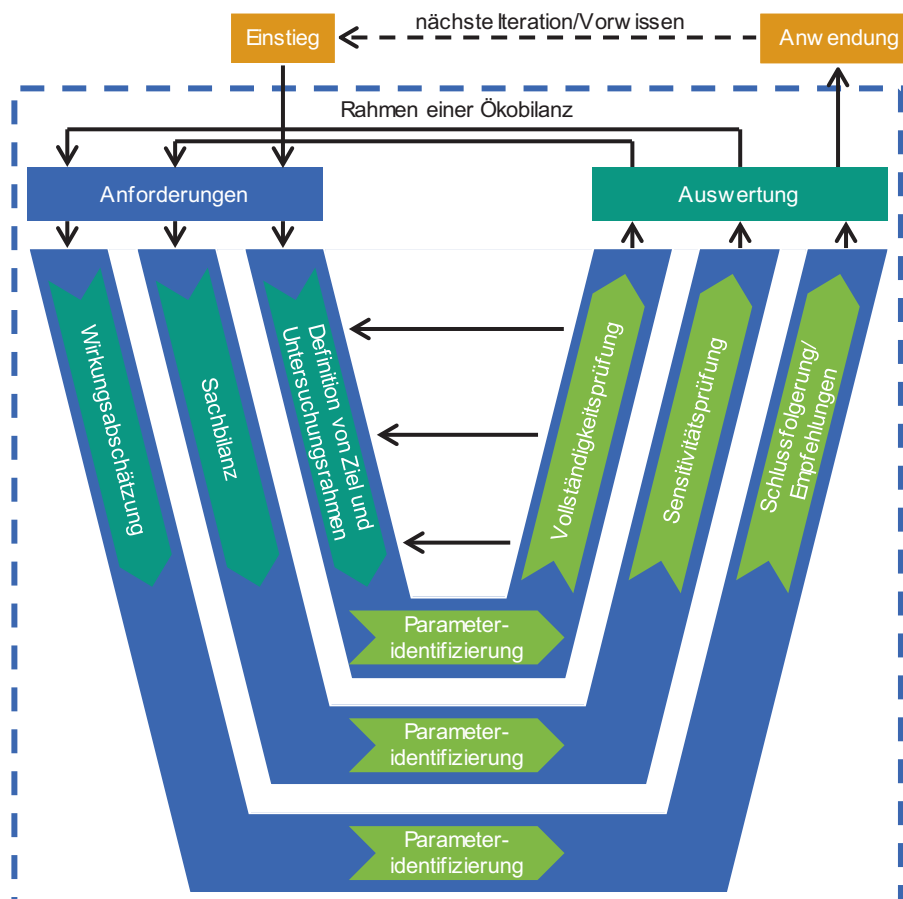


Bild 2. Darstellung der LCA-Methodik in Form des V-Modells nach [5] aus [4]

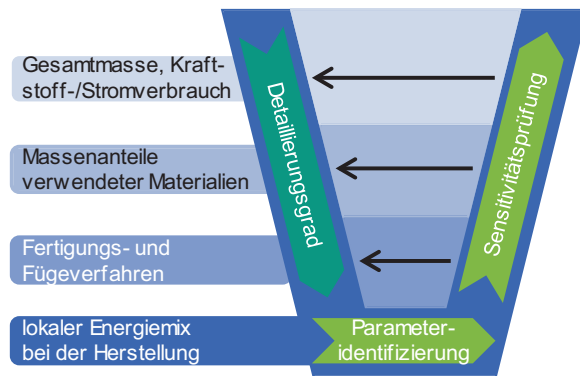


Bild 3. Detaillierungsgrad der Sachbilanz-Datenbasis als V-Modell nach [4]

### 3.2 Vergleichbarkeit von Ökobilanz-Studien

Die Vielzahl der vorgestellten Eingangsgrößen macht deutlich, wie stark die einer Studie hinterlegten Annahmen und auch die Qualität der Eingangsgrößen das Ergebnis entscheiden. Damit sind Studien mit scheinbar abweichenden Aussagen oft nicht schlechter oder besser als andere Studien, es wurden nur ein anderer Untersuchungsrahmen, andere Randbedingungen oder andere Basisdaten der Betrachtung zugrunde gelegt.

Keine Studie ist als finales Ergebnis zu betrachten, sondern wie oben dargestellt, Teil eines iterativen Prozesses.

Zur Veranschaulichung der Auswirkungen verschiedener Annahmen des Untersuchungsrahmens (Phase 1) auf die Treibhausgasbilanz einer Ökobilanz von batterieelektrischen Pkws (BEV) sowie konventionell angetriebenen Fahrzeugen (ICEV) erfolgte eine Gegenüberstellung zweier aktuell diskutierter Studien [6]. Während die Studie des Fraunhofer ISI [7] zum Ergebnis kommt, dass ein BEV über den Fahrzeuglebensweg zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich mit einem ICEV führt, kehrt sich das Ergebnis in der ifo-Studie [8] um. Entscheidenden Einfluss auf die Treibhausgasbilanz besitzen hierbei die Annahmen über die Batteriekapazität und -lebensdauer, der Stromerzeugungsmix zur Batterieherstellung und zum Laden, der Energiebedarf im Betrieb sowie die Gesamtfahrleistung und die Fahrzeugklasse. Neben grundsätzlich benötigten Informationen, wie Werte für Strommix, Verbrauch etc., unterscheiden sich viele Studien auch hinsichtlich ihrer Systemgrenze. So werden in der Fraunhofer-Studie [7] beispielsweise auch weiterführende Szenarien bezüglich erneuerbaren Stroms inklusive der Auswirkung eines Lastmanagements untersucht, während in der ifo-Studie [8] die „Volatilität“ erneuerbarer Stromquellen eher generell thematisiert wird. Auch zu weiteren energiepolitischen Herausforderungen nehmen die

beiden Studien Stellung, beispielsweise welcher Strom-/Energienmix für die Energieträger der Fahrzeuge herangezogen werden kann. Eine weiterführende Analyse der beiden Studien kann [6] entnommen werden.

Für die hier vorliegende Studie wurden folgende Annahmen und Randbedingungen zugrunde gelegt (siehe auch Tabelle 3):

- 1 Es wird kein Batterierecycling betrachtet, da es in Studien sowohl Ergebnisse mit einer positiven Auswirkung eines Recyclings als auch Studien mit negativen Auswirkungen, das heißt erhöhter CO<sub>2</sub>-Emission gibt [9; 10]. Das Thema ist Gegenstand der Forschung und in Zusammenhang mit der Umweltbilanzierung Teil des wissenschaftlichen Disputes und muss in einer überarbeiteten Version dieser Studie berücksichtigt werden.
- 2 Es wurden keine Auswirkungen der einen oder anderen Technik auf eine notwendige Infrastruktur berücksichtigt (400.000 öffentliche Ladepunkte nach Aussage des Bundesverbands e-Mobilität [11]). In einer weitergehenden Studie sollte der Systemrahmen entsprechend gesteckt werden, dass diese Effekte abgebildet werden. Bei der Verwendung regenerativ synthetisierter Kraftstoffe wurden nur Kraftstoffe betrachtet, die in den bestehenden Kraftstoffnormen enthalten sind.

Neben den oben genannten Einschränkungen gibt es noch weitere Themenfelder, die nicht berücksichtigt wurden, da keine konkreten Informationen vorlagen oder der Aufwand im bisherigen Zeitrahmen noch nicht umsetzbar war:

- 1 Infrastrukturaufwendungen: Bei keinem der Antriebe wurden Infrastrukturaufwendungen betrachtet, weder eine zusätzliche Infrastruktur zur regenerativen Synthese von Kraftstoffen (die nach RED II zusätzliche Energiequellen erfordern), noch eine Infrastruktur für Wasserstoff (die im Rahmen der Europäischen Wasserstoffinitiative geplant wird) noch eine Infrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge [11] inklusive der nachgelagerten angepassten Anbindungen im Nieder- und Mittelspannungsnetz. Ein oft nicht beschriebener Aspekt ist hier der Umgang der einzelnen Techniken mit der Fluktuation des regenerativ gewonnenen Stroms. Je nach Technologie müssen lokale oder zentrale Speicher installiert werden, deren Produktion sich bei der Anwendung der Technologien bemerkbar macht.
- 2 Zusätzliche Ladeverluste durch Schnellladungen bei batterieelektrischen Fahrzeugen müssten eigentlich im Verbrauch abgebildet werden. Die Darstellung in diesem Bericht versucht nicht, alle

derartigen Details abzubilden, sondern eher die Möglichkeiten und Perspektiven aufzuzeigen.

- 3 Abweichungen des Realverbrauchs vom WLTC-Verbrauch [12].
- 4 Die größten Einflussfaktoren sind und bleiben die Fahrenden und die Umstände, unter denen das Fahrzeug betrieben wird. Die Technologien zeigen unterschiedliche Effekte beim Betrieb in kalten Umgebungsbedingungen, die immer zu einem Mehrverbrauch führen.

Bei der Verwendung von Zyklen werden Use-Case-spezifische Auswirkungen auf die Effizienzkenfelder

der Antriebsstrangkonzeppte überdeckt, wodurch die Realitätsnähe eingeschränkt wird. Dieser Aspekt ist Teil der gegenwärtigen Forschung.

Es ist anzumerken, dass diese Studie nicht nur auf die Umweltwirkungskategorie des Klimawandels und damit auf die Bilanzierung von Treibhausgasen beschränkt ist. Für eine vollumfängliche Ökobilanzierung sind auch Rohstoffbedarf, Wasserverbrauch, Versauerung, Humantoxizität und Sommersmog von relevanter Bedeutung. Da die Gewichtung dieser Wirkungskategorien zueinander nicht festgelegt werden kann, werden die unterschiedlichen Bilanzen in Form von normierten Netzdiagrammen verglichen.

## 4 VDI-Ökobilanz

Dieses Kapitel soll einen detaillierten Einblick in das Vorgehen bei der Erstellung der LCA geben. Neben Ziel und Untersuchungsrahmen werden die Datenlage sowie die Umsetzung mittels der Open-Source-Software openLCA der Firma GreenDelta dokumentiert.

### 4.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

In Anlehnung an DIN EN ISO 14040 [2] wurden für diese Ökobilanz das Ziel und der Untersuchungsrahmen definiert, welche sich entsprechend der beiden nachfolgenden Tabellen aufgliedern lassen. Nach Tabelle 1 besteht das Ziel dieser LCA darin, Pkws mit unterschiedlichen Antriebssystemen im Hinblick auf ihre Umweltauswirkungen zu vergleichen.

In Tabelle 2 sind die einzelnen Elemente des Untersuchungsrahmens aufgelistet.

Als übergeordnetes Produktsystem wurde der Mittelklasse-Pkw ausgewählt, da dieses Segment in großen Stückzahlen bedient wird und sich auch bereits einige batterieelektrische Fahrzeuge wie der „BMW i3“ oder der „VW e-Golf“ in nennenswerten Stückzahlen auf dem Markt befinden. Aufgrund der im VDI-Fachbeirat bereitgestellten Daten wurden im ersten Schritt ein batterieelektrisches Fahrzeug (BEV), ein Dieselfahrzeug (ICEV-d) und ein Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) betrachtet.

Für realistischere Vergleiche mit der Brennstoffzelle muss eventuell die Fahrzeugklasse geändert werden, da diese Technologie aktuell vorwiegend bei größeren Fahrzeugen verbaut ist. Als funktionelle Einheit wird der Fahrzeugkilometer herangezogen.

Die Systemgrenze umfasst aktuell Herstellung und Nutzung des Fahrzeugs inklusive Bereitstellung und Transport der Antriebsenergie. Informationen zu Instandhaltung und Entsorgung liegen nur bedingt vor, was die Implementierung damit auf die etablierten Anwendungsfälle einschränkt (Fahrzeugrecycling und bekannte Wechselintervalle von Produkten). Allokation (Zuordnung beispielsweise von Abfallprodukten und -prozessen) und Abschneidekriterien (Grenzen der Stoffpfade und Zuordnung der Wirkungen zu Produktion, Instandhaltung und Recycling) werden entsprechend der Datenbank „ecoinvent 3.5“ angewendet. Dem Recycling werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen der dazu notwendigen Energie zugeordnet, die bei den Prozessen gewonnenen Rohstoffe aber innerhalb der Produktionsprozesse abgezogen. Die durch Recycling gewonnenen Materialien verursachen damit eine geringere Wirkung in der Produktion, aber eine höhere Wirkung im Recycling. Bei Metallen sind dies etablierte Prozesse mit positiver Gesamtbilanz. Bei neueren Produkten wie der Batterie sind die Prozesse noch nicht industriell etabliert.

Tabelle 1. Ziel der VDI-Ökobilanz

Anwendung	umwelttechnischer Vergleich von Pkws mit unterschiedlichen Antriebssystemen
Grund für die Durchführung der Studie	transparente Studie von unabhängiger Seite, Betrachtung aktueller Antriebssysteme, Sensitivitätsanalysen
Zur Veröffentlichung bestimmt	VDI-Studie, Tagungen, Journals

Tabelle 2. Untersuchungsrahmen der VDI-Ökobilanz

Untersuchte Produktsysteme	Mittelklasse-Pkws der Kompaktklasse mit unterschiedlichen Antriebssträngen  dieselmotorische und batterieelektrische Antriebe und Brennstoffzellenantriebe - hybridisierte Antriebe sind in dieser Studie noch nicht abgebildet.
Funktionelle Einheit	Fahrzeugkilometer
Systemgrenze	Herstellung und Nutzung des Fahrzeugs inklusive Bereitstellung und Transport der Antriebsenergie
Allokation und Abschneidekriterien	nach „ecoinvent 3.5“-Cutoff
Wirkungskategorien aus den Bereichen Humangesundheit, Ökosystem und Ressourcenbegrenzung	Treibhausgaseffekt (GWP100), Humantoxizität (HTPinf), Sommersmogpotenzial (POFP), Meeresversauerungspotenzial (MEP), Nutzung und Transformation natürlichen Landes (NLTP)
Wirkungsabschätzungsmethode	ReCiPe Midpoint (H)
Anforderung an die Daten	möglichst aktuelle Fahrzeugdaten inklusive Normverbräuchen, aktuelle sowie zukünftige Strommixe
Annahmen	Instandhaltung und Entsorgung in erstem Schritt vernachlässigbar
Einschränkungen	Materialmix des Fahrzeug-Gliders (in der LCA übliche Bezeichnung für das Restfahrzeug ohne Antriebsstrang, Tankinhalt und Fahrer) ist gemäß Datenbank „ecoinvent 3.5“ bezogen auf Fahrzeuge aus den Jahren 2000-2010.
Anfängliche Anforderungen an die Datenqualität	aktuelle Hintergrunddatenbank, massenbasierte Erfassung der Antriebskomponenten
Art der Prüfung	VDI-Fachbeirat, KIT-intern

## 4.2 Sachbilanz

Eine Umweltbilanz findet in einem abgeschlossenen Systemraum statt. Dabei werden Inputgrößen wie Rohstoffe und Energie durch Prozesse in Outputgrößen wie Produkte oder Emissionen umgesetzt, siehe Bild 4.

Bei Betrachtung der Wirkungskategorie Klimawandel werden die dabei entstandenen Treibhausgasemissionen in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten aufsummiert.

Als Fundament für die Sachbilanz in dieser Studie wird die Datenbank „ecoinvent“ in der Version 3.5 verwendet, die am 23. August 2018 veröffentlicht wurde. Der „ecoinvent 3.5“-Datenbestand beinhaltet Sachbilanzdaten zu:

Energie (Strom, Öl, Kohle, Erdgas, Biomasse, Biotreibstoffe, Bioenergie, Wasserkraft, Atomenergie,

Fotovoltaik, Windkraft, Biogas), Materialien (Chemikalien, Metalle, mineralische Rohstoffe, Kunststoffe, Papier, Biomasse, Biomaterialien), Abfallentsorgung (Kehrichtverbrennung, Deponie, Abwasserreinigung), Transporte (Straße, Schiene, Luft, Wasser), landwirtschaftliche Produkte und Prozesse, Elektronik, Metallverarbeitung und Gebäudelüftung.

Die Datenbank wurde in den späten 1990er-Jahren aufgesetzt [13]. Dadurch sind insbesondere auch die in Bild 4 dargestellten Elementarflüsse abgedeckt, beispielsweise CO<sub>2</sub>, das der Umwelt entnommen oder an diese abgegeben wird.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Datenbank „ecoinvent 3.5“ strukturell nicht die aktuellsten Materialmixe enthalten kann und beispielsweise verstärkter Leichtbau mit Kohlefasern oder hohe Elektrifizierungsgrade separat abgebildet werden müssen.

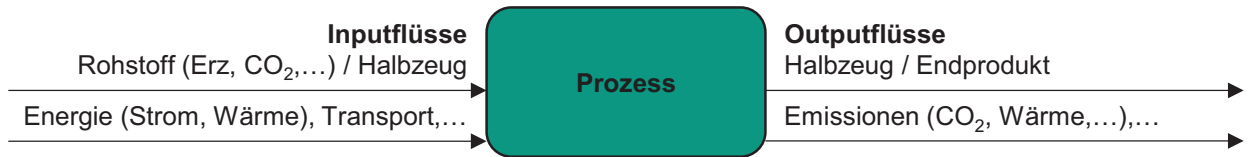


Bild 4. Umwandlung von Input- in Outputgrößen durch Prozess

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der Modellierung der Antriebsstränge, was beispielhaft in Bild 5 dargestellt ist.

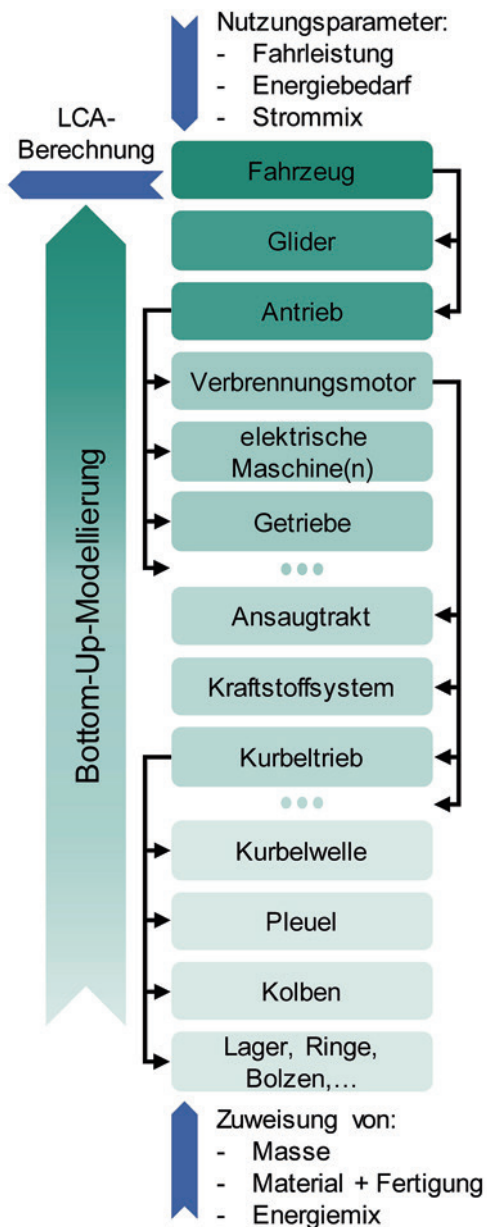


Bild 5. Beispielhafte Darstellung der Bottom-up-Modellierung

Hier wird das Gesamtsystem vom Einzelteil an aufgebaut. Den einzelnen Komponenten (z. B. Pleuel, Kolben) wird je eine Masse sowie Materialien inklusive Fertigungsprozess zugewiesen. Diese Parametrierung

kann jederzeit auf andere Motoren angepasst werden. Darüber hinaus werden die für die Nutzung relevanten Parameter wie die Fahrleistung oder der Strommix definiert.

Zusätzlich zum Untersuchungsrahmen (Tabelle 2) sind anwendungsfall-spezifische Annahmen zu Strommix, Batteriekapazität etc. in Tabelle 3 aufgeführt.

Auf Basis typischer, im Feld befindlicher Kompaktfahrzeuge [14; 15] werden weitere Randbedingungen der Studie festgelegt, beispielsweise die Fahrzeugmasse, siehe auch Tabelle A2.

Nicht Bestandteil der Betrachtungen sind hybridisierte Fahrzeugantriebe. Damit sind weder sogenannte Vollhybride noch Plug-in-Hybride in dieser Studie abgebildet. Derartige Fahrzeugkonzepte sollen Inhalt der zukünftigen Weiterführung dieser Betrachtungen sein.

Wesentliche Fahrzeugdaten für Fahrzeuge der Kompaktklasse wurden aus publizierten Werten übernommen. Neben den von Mitgliedern des VDI-Fachbeirats bereitgestellten Daten mussten auch andere Quellen bedient werden, beispielsweise die Datenbank „ecoinvent 3.5“, Online-Ersatzteildatenbanken oder eigene Berechnungsgrundlagen. Materialspezifische Details des SCR-Systems wurden einer Bachelorarbeit entnommen, die am IFKM betreut wurde [16]. Über die Herkunft der Daten gibt Tabelle 4 Auskunft.

Für das BEV standen keine detaillierten Herstellerdaten zur Verfügung, weshalb einzelne Subsysteme aus „ecoinvent 3.5“ (z. B. Leistungselektronik) oder aus der Literatur entnommen wurden (E-Maschine aus [17; 18]). Für die Batterie wurde auf Vorarbeiten am KIT zurückgegriffen, die verschiedene Batterieausführungen beinhalten [19]. Die Fertigung der Batteriezellen erfolgt je nach Betrachtung in dieser Studie in China oder Europa. Die Montage der Batterie ist wie auch die Fahrzeugmontage und die Brennstoffzellenmontage für Europa abgebildet.

Damit erfolgt die Batteriefertigung auch in den geschichteten Stufen Materialgewinnung, Aktivmaterialfertigung, Zellenfertigung, Zell-Pack-Fertigung und Batteriefertigung. Die jeweiligen Transporte und zusätzlichen Elemente (Material Zell-Pack, Kühlung, Batteriemanagementsystem) sind analog der Fertigung in den entsprechenden Abbildungsstufen hinterlegt [20].

Eine häufig verwendete Batteriezelle bei Lithium-Ionen-Batterien ist vom Typ NMC111, was bei den aktiven Kathodenelementen für paritätische Anteile an Nickel, Mangan und Cobalt steht. Aktuelle Zellentwicklungen reduzieren den Cobalt-Anteil, beispielsweise in den NMC622-Zellen [21]. Neben dem reduzierten Cobaltanteil geht ein erhöhter Nickelanteil mit einer um bis zu 25 % höheren gravimetrischen Energiedichte einher [22]. Mit diesen Vorteilen sind aber auch neue Aufgaben verknüpft, wie ein erhöhtes thermisches Sicherheitsrisiko [23], ein höherer Aufwand in der Nickelherstellung zur Erzielung der Ni<sup>3+</sup>-Konfiguration und eine erhöhte Selbstentladung, die in der NMC811-Zelle mit bis zu 35 % ausfallen kann [24]. Mangels vorliegender Daten konnten die hierzu notwendigen Kompensationen (z. B. adaptierte Brutto-Batteriekapazität, erweiterte Kühlung) nicht in der Umweltbilanz berücksichtigt werden. Die Ergebnisse

mit NMC622-Batterien sind eher als Perspektive zu betrachten.

Analog zu dieser Betrachtung sind auch weitergehende Unterschiede zwischen Brutto- und Netto-Batteriekapazitäten z. B. durch häufigere Einsätze unter reduzierten Temperaturbedingungen nicht abgebildet. Nach Zeyen et al., Dorr et al. und Leuthner et al. in [25] sind hier höhere Batteriekapazitäten vorzusehen.

In Ergänzung zur Übersicht der Datenquellen zeigt Tabelle 5 auf, dass in einigen Kategorien nur bedingt (Energimix, Materialmix und Verbrauch) bzw. gar keine Daten (Entsorgung, Instandhaltung) vorliegen. Mit Blick auf die Gesamtmenge der CO<sub>2</sub>-Äquivalente spielen diese Elemente eine untergeordnete Rolle, wenn man einen Schaden und Austausch der höher belasteten Komponenten (Motorblock, Batterie etc.) ausschließt.

Tabelle 3. Annahmen der Ökobilanzstudie

Kategorie	
Fahrzeugklasse	Von den verschiedenen Pkw-Fahrzeugklassen - Kleinwagen, Mittelklasse, Oberklasse und Allzweckfahrzeuge (SUV) - wird exemplarisch das Mittelklassensegment betrachtet.
Fahrleistung	(1...300.000) km
Energiebedarf	WLTC
Kraftstoffbedarf ICEV-d	Korreliert mit der Energiebedarfsgrundlage; Kurzstrecken- und Langstreckenbetrieb erhöhen oder verringern den Wert. WLTC-Werte sind eine geeignete Basis.
Strombedarf BEV	Korreliert mit der Energiebedarfsgrundlage; WLTC-Werte sind eine geeignete Basis, auch wenn Abweichungen zum Realverbrauch bekannt sind [12].
Batteriekapazität	Aktuelle Fahrzeuge zeigen eine steigende Batteriekapazität; hier wird eine Auswahl ((48...82) kWh) betrachtet.
Batterielebensdauer	Die Fahrleistung geht in die Berechnung ein, nicht die Lebensdauer. Ein möglicher Batterietausch als Teil der Instandhaltung ist nicht Teil der Betrachtung. Die Lebensdauer der Batteriezellen unterliegt vielfältigen Einflussgrößen und ist Gegenstand laufender Entwicklungen.
THG bei der Batterieproduktion	Die Zellenproduktion ist heute in China und mit deren Strommix hinterlegt, aber in absehbarer Zeit wird es auch eine signifikante Produktion in Europa geben. Dies wird über verschiedene Baujahre (BJ) und Standorte berücksichtigt. Bei Zellenfertigung in Südkorea, Japan und USA ist ein günstigerer Strommix als in China anzunehmen. Die Montage der Batterien wurde mit europäischem Strommix abgebildet.
THG in Abhängigkeit vom Strommix im Betrieb	Wenn nicht anderweitig vermerkt, wird eine Nutzung in Deutschland angenommen. Es werden jahresabhängige Brutto-Strommische, das heißt inklusive Leitungs- und Umspannerverlusten, berücksichtigt. An ausgewählter Stelle wird zum Vergleich auch der Strommix der Europäischen Union (EU) herangezogen.



Tabelle 4. Datenquellen der VDI-Ökobilanz

	Hersteller (direkt)	Hersteller (Broschüre)	Datenbank	Eigene Annahme
Fahrzeug	-	Gesamtmasse, Verbrauch etc.	-	-
Glider	-	-	„ecoinvent 3.5“	-
Verbrennungsmotorischer Antrieb	Daten von Ford (Auszug aus Fahrzeugstückliste; Motor, Kupplung, Kabelbaum)	-	Ersatzteildatenbank von Ford	Zuordnung von Materialien zu Komponenten, IFKM-eigene Recherchen; IFKM-Bachelorarbeit zu SCR-Systemen
Elektroantrieb	-	Leistung, Art der E-Maschine	Leistungselektronik aus „ecoinvent 3.5“	E-Maschine aus LCI der TU Chalmers [17; 18]
Batteriesystem	-	Kapazität	-	Datensatz von ITAS, Basis-Modell nach Notter [19]
Energiedaten	-	-	Struktur aus „ecoinvent 3.5“	Strommix 2020, 2030 (DE, EU, CN)
Elementarflüsse	-	-	„ecoinvent 3.5“	Zuordnung von Materialien

Tabelle 5. Visualisierung des Detaillierungsgrads/der Qualität der Daten

Prozessschritt (Teilprozess)	Energiemix	Masse	Verbrauch des Fahrzeugs	Material/Fertigung
Herstellung	zeitliche und räumliche Mittelung verschiedener Länder (DE, EU, CN)	Masse von Glider und Antriebskomponenten		teilweise aktualisierter Materialmix
Nutzung	siehe oben, basierend auf Daten aus „ecoinvent 3.5“	siehe oben	Normverbrauch (WLTC)	
Entsorgung	keine Daten	Metalle, Daten in „ecoinvent 3.5“ enthalten		Metalle, Daten in „ecoinvent 3.5“ enthalten
Instandhaltung	keine Daten	nur bei bekannten Verschleißkomponenten		keine Daten

Der aktuelle Betrachtungs-Use-Case basiert auf dem WLTC-Betrieb zur mittleren Abbildung des Verbrauchs und der zugehörigen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die Betrachtung realistischerer Einzel-Use-Cases erfolgt innerhalb der Auswertung anhand von drei Szenarien (Wenigfahrende, mittlere Fahrerin/mittlerer Fahrer und Vielfahrende).

Die Bestimmung der Masse des Gliders (in der LCA übliche Bezeichnung für das Restfahrzeug ohne Antriebsstrang, Tankinhalt und Fahrerin bzw. Fahrer) erfolgt indirekt. Das Leergewicht des Fahrzeugs wird Herstellerangaben entnommen. Davon wird die Masse des detailliert hinterlegten Antriebsstrangs, der Fahrerin bzw. des Fahrers sowie des Tanks abgezogen.

$$m_{\text{Glider}} = m_{\text{Fahrzeug}} - m_{\text{Antriebsstrang}} - m_{\text{Fahrer}} - m_{\text{Tank}}$$

Damit wird bis jetzt die Glider-Masse für alle Betrachtungen gleichgesetzt.

Der Materialmix des Gliders wird gemäß dem in der Datenbank „ecoinvent 3.5“ hinterlegten Materialmix betrachtet, nach Aussage von Fachleuten ist dieser bezogen auf ein Fahrzeug aus dem Jahr 2004. Damit werden heutige, stärker elektrifizierte Fahrzeuge oder gar E-Fahrzeuge nicht korrekt abgebildet, aber es wird eine Basis für einen Vergleich der Antriebsstränge geschaffen.

Systemzusammenhänge und -abhängigkeiten (z. B. bei der Masse) sind in der aktuellen Version der verwendeten LCA-Software („openLCA 1.10.2“) nicht automatisiert abgebildet. So wird die gravimetrische Energiedichte parametrisiert, aber die Masse des Batteriepacks anhand zusätzlicher Rechenskripte angepasst.

### 4.3 Energiequellen

Einen wesentlichen Anteil an den emittierten CO<sub>2</sub>-Äquivalenten hat die jeweilige Energieversorgung der Fahrzeuge in der Produktion als auch im Betrieb.

#### 4.3.1 Strommix

Zur Abbildung der lokal und pro Bezugsjahr unterschiedlichen Effekte des Stromnetzes müssen eine Vielzahl von Effekten und der jeweilig lokale Nettostrommix, aber auch die Brutto-Umwandlungsverluste berücksichtigt werden [26].

Derartige Zusammenhänge sind für den deutschsprachigen Raum in der Datenbank „ecoinvent 3.5“ hinterlegt, basieren aber auf Stromdaten frühestens aus dem Jahr 2018, für einige Regionen sogar 2010. Für Deutschland hat die Denkfabrik „Agora Energie-

wende“ in einer Studie [27] einen Strommix 2030 definiert. Der Zielwert von 65 % erneuerbarer Energien im Stromsektor 2030 entspricht der aktuellen Vorgabe der Bundesregierung und wurde in dieser Studie verwendet. Für den schrittweisen, nach Jahren aufgelösten Umbau des Energieversorgungssystems wurde die Abschaltung der Kernkraftwerke innerhalb der Stützstellen von „Agora Energiewende“ berücksichtigt. Um aktualisierte Werte für das Jahr 2020 sowie ein Szenario für das Jahr 2030 für die EU und China zu implementieren, wurde auf die Werte der EU [28] und des Pekinger Energiewirtschaftsinstituts [29] zurückgegriffen und die entsprechende Verteilung an Stromquellen hinterlegt. Die Strommix-Daten sind im Anhang in Tabelle A1 zu finden.

#### 4.3.2 Wasserstoffmix

Die aktuell gebräuchlichste Version der Wasserstoffherzeugung erfolgt mittels sogenannter Dampfreformierung (Steam Methane Reforming, SMR [28]) auf Basis von Methan. Da diese Methanquellen aus Kostengründen heute meist fossil sind, spielen sie in Szenarien als CO<sub>2</sub>-Speichertechnik (Carbon Capture and Storage, CCS) eine Rolle. Die Synthese aus Wasser mittels Alkali-Elektrolyse oder Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM) hat den Vorteil der Kohlenstofffreiheit, ist aber beim gegenwärtigen Stand der Technik kostenaufwendiger. Da die Entscheidung zwischen den beiden Verfahrenswegen von vielen Faktoren abhängt und noch nicht beschlossen ist, hat die EU in ihrer Wasserstoff-Roadmap [48] zwei Szenarien gebildet, wobei in einem Szenario die Wasser-Elektrolyse-Verfahren dominieren und in dem anderen Szenario SMR und autotherme Reformierung (ATR).

Da sich die Wasserstoffmixe im Jahr 2020 nicht wesentlich unterscheiden, wurde als Basis der Studie ein gemittelter Wasserstoffmix aus 2020 und 2030 zugrunde gelegt. Der Wasserstoffmix wird durch die gestarteten politischen Rahmenprogramme in Deutschland und in der EU weitere Fortschritte erzielen.

Sollte die wasserbasierte Elektrolyse politisch forciert werden, bietet das sehr großes CO<sub>2</sub>-Reduktions-Potenzial für den Einsatz von Brennstoffzellenantrieben oder Wasserstoffmotoren.

### 4.4 Implementierung in openLCA

In Rahmen dieser Studie wurde das Softwarepaket „openLCA 1.10.2“ [30] genutzt. Dieses Open-Source-Tool ermöglicht die Umsetzung der vorgestellten Methodik in weiteren Folgeprojekten. Ferner hat dieses Tool Schnittstellen („Python“), die für die Zukunft

eine Verknüpfung mit im Ingenieur-Entwicklungsprozess üblichen Softwarewerkzeugen denkbar machen.

Wie im vorigen Kapitel in Bild 5 gezeigt, wurde der Antrieb nach dem Bottom-up-Prinzip modelliert. Hierbei wurden alle von den Fachbeiratsmitgliedern angegebenen Einzelmassen hinterlegt. Neben den Massendaten konnten hier Ersatzteillisten von Großhändlern detaillierte Angaben liefern.

Durch die Verwendung des Tools ergeben sich diverse Anpassungsmöglichkeiten:

- Variation der Massen einzelner Komponenten, beispielsweise Größe
- Variation der Energieversorgung in Abhängigkeit von Standort, Zeitpunkt und Technologie
- Hinzufügen/Detaillieren/Entfernen von Komponenten, vor allem aus dem Sensorik- und Aktorikumfeld des Antriebsstrangs, u. a. um den Einfluss von Technologiebausteinen bewerten zu können

Um die unterschiedlichen Energiemixe gemäß ihrem jeweiligen Strommix zu implementieren, wurde die in der Datenbank „ecoinvent 3.5“ abgebildete Struktur aus Hoch-, Mittel-, und Niederspannungsnetzen genutzt. Damit sind die Umweltauswirkungen verschiedener Energieversorgungsarten hinterlegt. Die verwendete Datenbank ist von 2018 und enthält dementsprechend nicht die aktualisierten Modelle der unterschiedlichen Kraftwerkstypen. Leitungs- und Umspannverluste sind analog dem deutschen Stromnetz hinterlegt, die Realverluste können durchaus höher ausfallen.

Die zugehörigen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind auch hier Mittelwerte, keine Grenzwertbetrachtungen. Eine Abbildung, die die unterschiedlichen Randbedingungen berücksichtigt, würde deutlich komplexer ausfallen und ist Gegenstand laufender Forschungsvorhaben.

Bei der Modellierung der Produktion der Batteriezellen wird im Wesentlichen auf bekannte Modelle der Produktion von NMC-Zellen von Ellingsen und deren Weiterentwicklung [19; 31; 32] aufgebaut. Basis ist die Zellenchemie einer NMC111-Zelle, das heißt paritätischer Nutzung von Nickel, Mangan und Cobalt auf der Kathode. Weiterentwicklungen fokussieren hier auf eine Reduktion des Cobaltanteils, um die kritische Lieferkette zu entlasten [33]. Der erhöhte Nickelanteil muss entsprechend aufbereitet werden, um den Sauerstoffaustritt aus den Zellen gering zu halten bzw. zu unterbinden. Diese Zellentypen bieten neben dem Vorteil eines geringeren Cobaltbedarfs große Möglichkeiten, die gravimetrische Energiedichte zu erhöhen [21], sodass es als mögliche Perspektive in der

Berechnung dargestellt wird. Der geringere Cobaltgehalt der Kathode hat wiederum Einfluss auf den möglichen exothermen Sauerstoffaustritt aus der Kathode und das damit verbundene Degradationsverhalten [34; 35]. Um dem entgegenzuwirken, wird das Nickel entsprechend behandelt [36]. Wenn sich aus dem veränderten Verhalten der Zellen weitergehende Anforderungen ergeben, beispielsweise an das Thermomanagement oder das Batteriemanagementsystem (BMS), so konnten hierzu noch keine Literatur oder Herstellerinformationen gefunden und deren Elemente abgebildet werden.

Mit Blick auf zukünftige Technologien werden auf der Kraftstoffseite Fischer-Tropsch-Kraftstoffe abgebildet, die mit Direct Air Capture (DAC) als Kohlenstoffquelle, Wasser-Elektrolyse als Wasserstoffquelle und Windenergie als Energieversorgung synthetisiert werden. Diese Technologie ermöglicht einen größtenteils geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf.

Da die Modellierungen hierzu noch nicht vollständig abgeschlossen sind, wurde auf das in dem Vorhaben „BioEnergieDat“ [37] entwickelte Modell zurückgegriffen, das auf Basis biogener Reststoffe (Stroh- und Holzreste) eine Syncrude erzeugt und daraus mittels Fischer-Tropsch-Prozessen analog der Choren-Anlage einen Dieselmotorkraftstoff synthetisiert hat. Die Analyse der Prozessschritte und der berücksichtigten externen Energiequellen hat gezeigt, dass die Umweltwirkungen der Prozesse sehr vergleichbar sind und damit eine Übertragbarkeit gegeben ist, mit der aufgezeigt werden soll, wie die Entwicklungsziele gelagert sind.

Bild 6 gibt einen Überblick über die Systemgrenze, in der die Modellierung in openLCA stattfindet. Informationen aus „ecoinvent 3.5“ sind rot, eigene Annahmen grün, Sekundärquellen wie die Biokraftstoffe blau und das nur auszugsweise berücksichtigte Recycling grau eingefärbt.

## 4.5 Ergebnisse

Die meisten Betrachtungen beschränken sich auf die Analyse der Treibhausgasemissionen, die die aktuelle Diskussion bestimmen. In den in Bild 6 dargestellten Systemgrenzen werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in den Rohstoffgewinnungs- und Fertigungsprozessen auftreten, mit denen in den Phasen der Nutzung, Instandhaltung und dem Recycling addiert. Gemäß der Visualisierung in Bild 8 sind hier Produktion und Nutzung dominant. Am Beispiel eines batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugs wird in Bild 7 der kumulative Effekt dargestellt, wobei knapp 60 % der Emissionen der Produktionsphase zuzuordnen sind. Ferner wird deutlich, wie sich der THG-reduzierte Strommix auf die Nutzungsphase auswirkt.

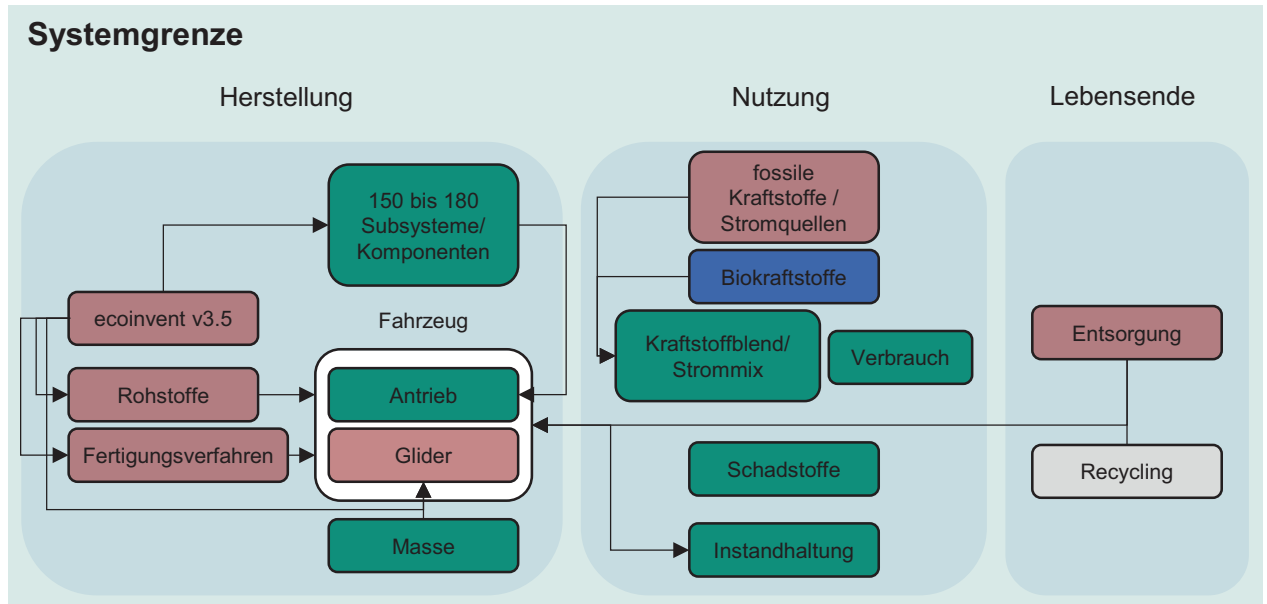


Bild 6. Systemgrenze der Ökobilanz-Modellierung in openLCA

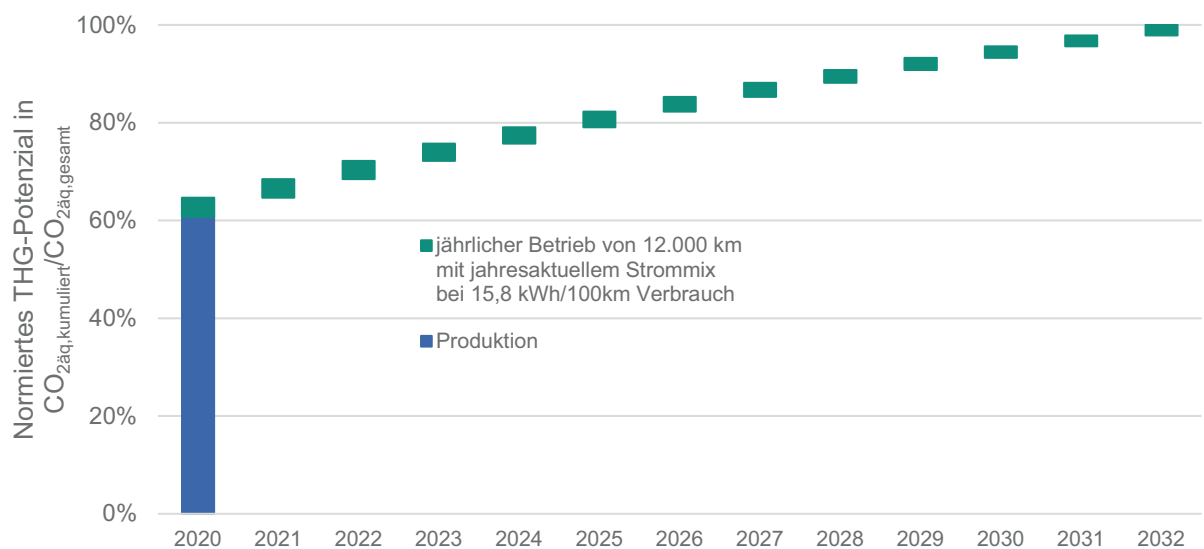


Bild 7. Kumulative Darstellung der produktions- und nutzungsbedingten CO<sub>2</sub>Äq.-Emissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) mit 15,8 kWh/100km Verbrauch und 48 kWh Batteriekapazität bei Produktion der Batteriezellen (China) und des Fahrzeugs (Europa) im Jahr 2020

Die Produktion der Fahrzeuge erfolgt meist an unterschiedlichen Standorten, was komplex zu berücksichtigen ist und meist vereinfacht der EU zugeordnet wird. In dieser Studie wird die energieintensive Batteriezellenproduktion alternativ in China oder der EU durchgeführt.

Eine Aufteilung der produktionsbedingten CO<sub>2</sub>-Äquivalente zeigt im Vergleich eines dieselmotorischen und eines batterieelektrischen Antriebsstrangs die

Thematik gut auf, siehe Bild 8. Auffällig sind der vergleichbare Anteil der Karosserie und des Restfahrzeugs (Glider) und der dominante Anteil der Antriebsbatterie, weswegen hier der Fokus der Entwickler liegt.

Exemplarisch sind hier unterschiedliche Produktionsstandorte für die Batteriezellenproduktion mit jeweils aktuellem und geplantem Strommix abgebildet.

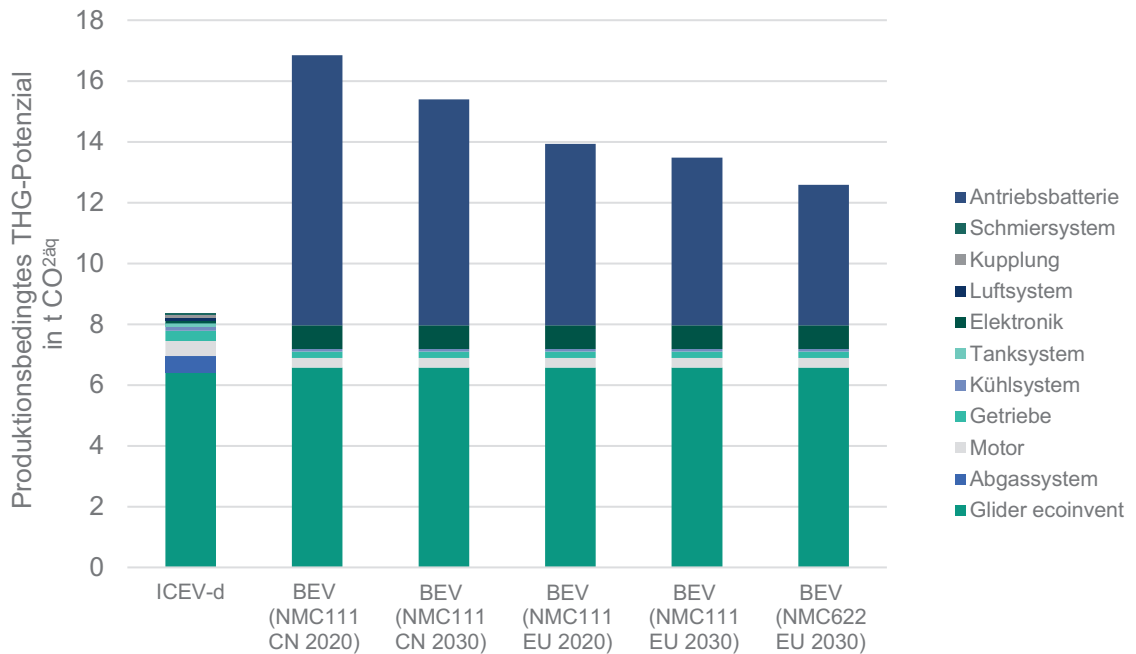


Bild 8. Produktionsbedingte CO<sub>2</sub>-Äquivalente eines Dieselfahrzeugs und eines BEV im Jahr 2020 mit blauem Balken für die Produktion des Gliders und dunkelblauem Balken für die Produktion einer 48-kWh-Batterie in China (Strommix 2020)

Die durch die Nutzungsphase bedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen hängen wesentlich von der Effizienz des Antriebs und dem CO<sub>2</sub>-Rucksack der Energiequelle ab.

Deutlich wird das in einer Darstellung des Vergleichs verschiedener Antriebsstrangtypen über die Laufleistung dieses Antriebs, siehe Bild 9. Die Berechnung geht davon aus, dass keine CO<sub>2</sub>-intensiven Komponenten innerhalb dieser Fahrleistung getauscht werden. Alle Fahrzeuge starten mit dem Produktions-Offset und zeigen die Emissionen in der Nutzungsphase an der jeweiligen Steigung der Geraden.

Bei der Betrachtung der Treibhausgasemissionen batterieelektrischer Fahrzeuge gilt es, sowohl die Lokalisierung (und damit die CO<sub>2</sub>-Belastung des Energie-

mixes) der Zellenproduktion als auch den Verbrauch des Fahrzeugs zu berücksichtigen. Der ADAC hat in einer Studie [11] an aktuellen Fahrzeugen eine steigende Entwicklung aufgezeigt, wobei der Mittelwert bei 17,6 kWh/100km für die angegebenen WLTC-Werte liegt. Um die Grafik nicht zu unübersichtlich werden zu lassen, ist der Bereich mit unterschiedlicher Produktionslokalisierung und unterschiedlichen Verbräuchen als hellgrüne Trapezfläche aufgespannt (siehe Bild 9).

Bei der Betrachtung des Brennstoffzellenfahrzeugs gilt es, die Herkunft des Wasserstoffs zu beachten. Hier ist der Wasserstoffmix aktuell im Wandel, was noch nicht abgebildet werden konnte.

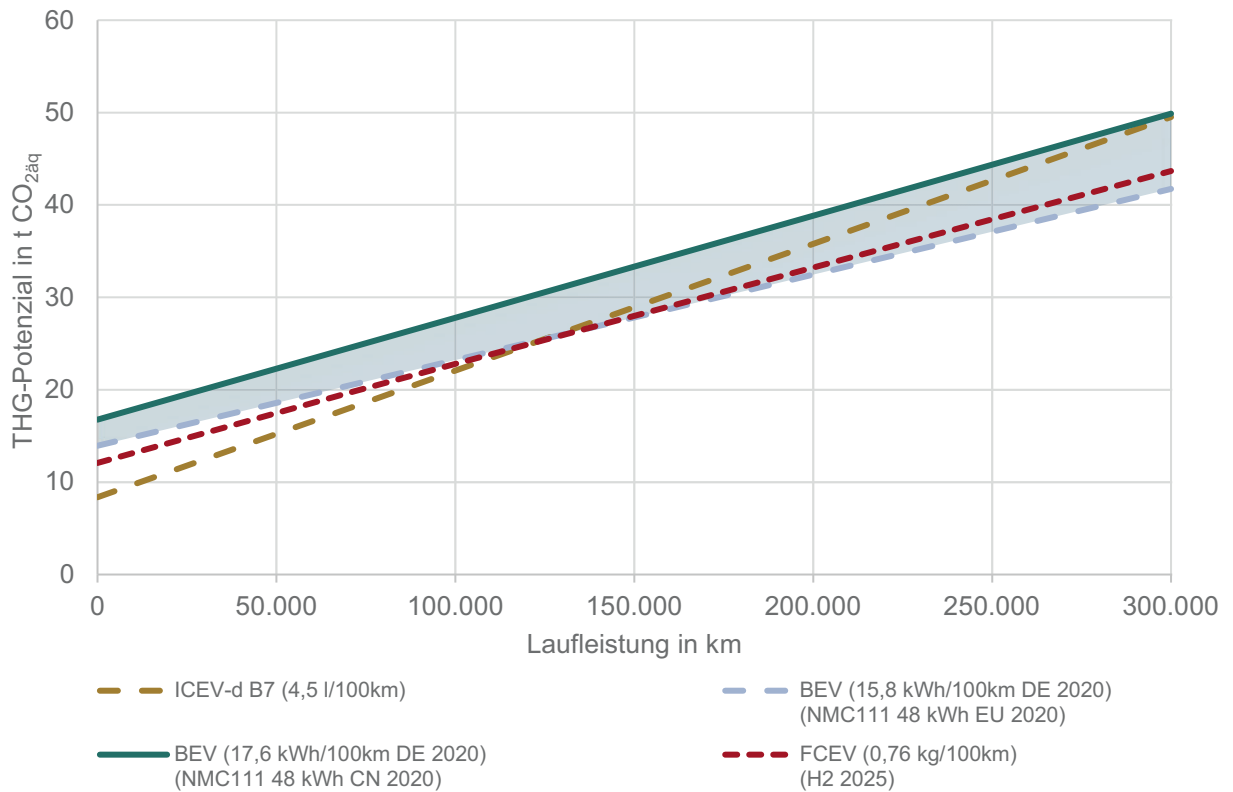


Bild 9. Vergleich der CO<sub>2</sub>-Äquivalente von im Jahr 2020 produzierten Fahrzeugen: 48 kWh BEV (Batteriezellen aus China, Fahrzeug aus Europa), Nutzung bei aktuellem Strommix in Deutschland, Brennstoffzellenfahrzeug mit 3,5-kg-H<sub>2</sub>-Tank und 1,4-kWh-Batterie sowie eines mit B7 betriebenen Dieselfahrzeugs

Bild 9 beschreibt den gegenwärtigen Stand (2020) mit aktuellem Strommix in Deutschland. Bei der Batterieproduktion wurde der chinesische oder der europäische Strommix im Jahr 2020 und die Batterie nach [31] zugrunde gelegt.

Die eigentliche Zelle wird unter diesen Bedingungen mit 160 kg CO<sub>2äq</sub>/kWh oder 100 kg CO<sub>2äq</sub>/kWh berechnet, während die Gesamtbatterie inklusive Package, Kühlsystem und Batteriemangement mit 185 kg CO<sub>2äq</sub>/kWh oder 124 kg CO<sub>2äq</sub>/kWh berechnet wird. Das Dieselfahrzeug wird mit einem WLTC-Verbrauch von 4,5 l/100km hinterlegt, das entsprechende batterieelektrische Fahrzeug mit 15,8 kWh/100km.

Aus dieser Grafik abzuleiten, dass ein batterieelektrisches Fahrzeug generell schlechter wäre, lässt außer Acht, wie sich

- 1 der Strommix in Deutschland ändert (-40 % CO<sub>2</sub>-Äquivalente bis 2030),
- 2 die Batterieproduktion bezüglich ihres CO<sub>2</sub>-Rucksacks sowohl in China als auch in der EU optimiert wird,
- 3 Ingenieurinnen und Ingenieure die Materialkombination auch hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Rucksacks optimieren.

Diesel- und Ottoantrieb unterscheiden sich nur geringfügig in der Herstellung, was ab einer Mindestfahrleistung vom Diesel über den günstigeren Verbrauch kompensiert wird.

Der Brennstoffzellenantrieb ist in dieser Betrachtung ab 100.000 km Fahrleistung einer der CO<sub>2</sub>-günstigsten Antriebe, was sich wie oben dargestellt auch mit dem zugrunde gelegten Wasserstoffmix erklären lässt.

Die Komplexität der Diskussion der Einflüsse liegt in dem Zusammenwirken von drei Parameterkategorien:

- 1 Einfluss der Materialien und der Produktionsbedingungen (CO<sub>2</sub>-Belastung der dazu verwendeten Energien) der Energiespeicher
- 2 Effizienz der Antriebe und die damit verbundenen Potenziale und Herausforderungen
- 3 Energieträger in der Nutzungsphase und die damit verknüpften Treibhausgasbelastungen

### Einfluss der Materialien und der Produktionsbedingungen der Energiespeicher

Je nach Fahrzeugtyp und Kundenwunsch werden batterieelektrische Fahrzeuge in unterschiedlichen Batteriekapazitäten angeboten, was sich direkt in den produktionsbedingten Treibhausgasemissionen zeigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt die entsprechende Sensitivitätsbetrachtung mit Blick auf den Energiespeicher nur mit dem Basis-Diesel und den batterieelektrischen Antrieben.

In Bild 10 sind zwei Effekte dargestellt: der Einfluss der verbauten Batteriekapazität und der Einfluss des Strommixes bei der Zellenfertigung.

Die Rechnung der oberen drei gestrichelten Linien basiert auf einer Zellenfertigung in China mit dem aktuellen Strommix (2020) für drei unterschiedliche Batteriekapazitäten (48,62 kWh und 82 kWh). Die vierte Linie (mintgrün/enger gestrichelt) zeigt den Einfluss der Defossilisierung des chinesischen Strommixes bis 2030. Die beiden unteren Linien zeigen die positiven Effekte einer Produktion in Europa mit dem mittleren europäischen Strommix 2020 und 2030.

Die Produktion einer Batteriezelle nach [31] sinkt dann auf 130 kgCO<sub>2äq</sub>/kWh. Wenn aber die Batteriekapazität angehoben wird (obere vier/parallele grüne Linien), steigt der CO<sub>2</sub>-Rucksack, erkennbar an dem höheren y-Achsen-Offset. Im Sinne einer minimierten

CO<sub>2</sub>-Bilanz sind Fahrzeuge mit kleinen Batteriekapazitäten zu bevorzugen.

### Effizienz der Antriebe und die damit verbundenen Potenziale und Herausforderungen

In Bild 11 werden Fahrzeuge mit unterschiedlichen Verbrauchswerten verglichen. Dieselfahrzeuge werden hier mit 4,5 l/100km als gängigem WLTC-Wert für Fahrzeuge des Kompaktsegments betrachtet. Wird ein Fahrzeug mit verbrennungsmotorischem Antrieb nur im Kurzstreckenbetrieb gefahren, wird sich der Verbrauch erhöhen. Im Langstreckenbetrieb (Autobahn mit Tempomat) sind dafür aber deutliche Absenkungen möglich. Hier werden 4,9 l/100km, bzw. 3,9 l/100km angenommen.

Auch bei batterieelektrischen Fahrzeugen wurden die Herstellerangaben auf Basis des WLTC betrachtet. Hier wird neben dem Basisfahrzeug mit 15,8 kWh/100 km zusätzlich der Mittelwert des Kompaktfahrzeugs des ADAC-Fahrzeugtests [12] (17,6 kWh/100 km) herangezogen.

Zur Vergleichbarkeit mit der vorherigen Abbildung wird auch hier eine Zellenfertigung in China zugrunde gelegt, die als Offset entsprechend den anderen Strommixen abgesenkt wird.

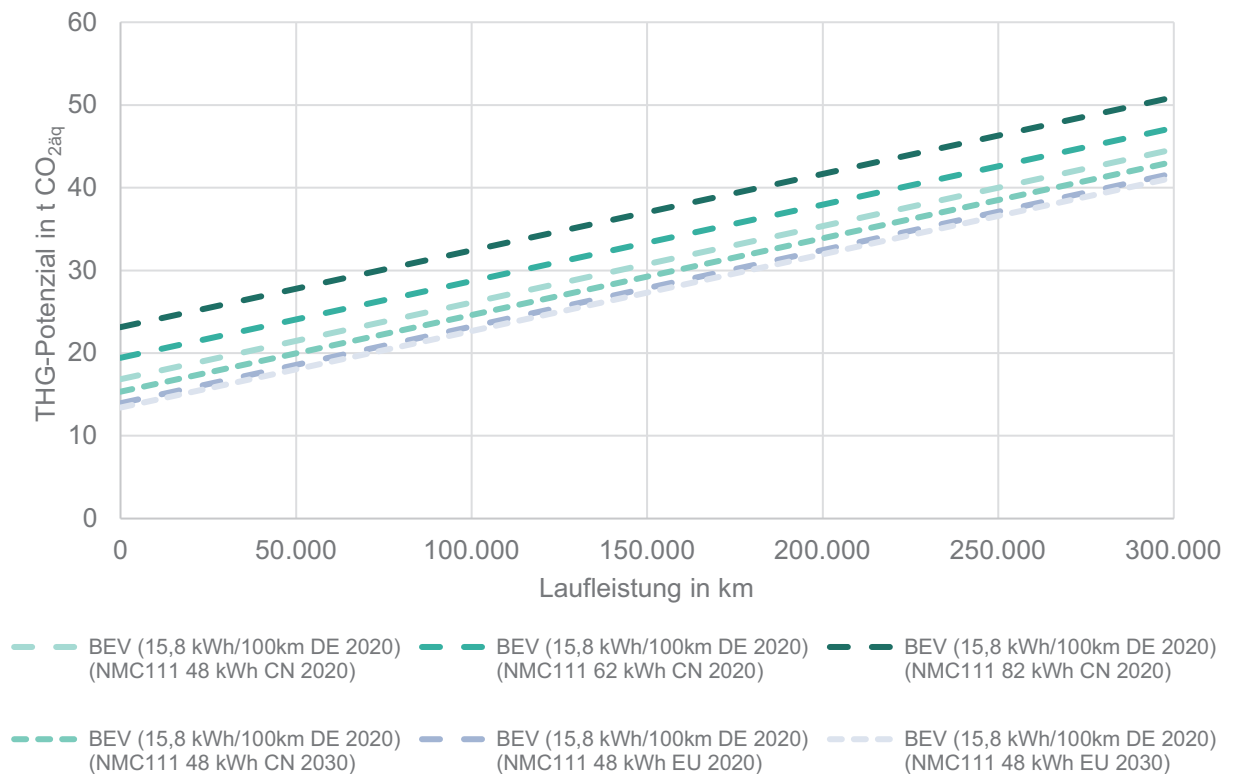


Bild 10. Sensitivitätsbetrachtung des THG-Potenzials der Batteriekapazität (grün gestrichelt BJ 2020 48 kWh, 62 kWh und 82 kWh) und Produktionsstrommix (europäischer Strommix in grau)

Die Abweichung der Realverbräuche von WLTC-Verbräuchen können so auch betrachtet werden. Die Fahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Antrieb sind wesentlich vom Verbrauch der fossilen Kraftstoffe dominiert, was die positive Auswirkung weiterer Entwicklungen in diesem Bereich verdeutlicht [38].

### Energieträger in der Nutzungsphase und die damit verknüpften Treibhausgasbelastungen

Eine weitere geeignete Methode zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase stellt die Defossilisierung des jeweiligen Energieträgers dar. Dies gilt für alle hier betrachteten Antriebe. Optimiert werden müssen die Stromversorgung, die Wasserstoffversorgung und die Kraftstoffversorgung. Erstere beiden Reduktionen sind in den Richtlinien der EU vorgegeben, während letztere eine Selbstverpflichtung mehrerer Ölkonzerne ist, die sich eine komplette Defossilisierung bis 2050 zum Ziel gesetzt haben [39; 40].

Ein Zwischenschritt auf diesem Weg ist der Einsatz eines Kraftstoff-Blends mit in Summe 33 % regenerativem Volumenanteil, in Bild 11 dargestellt als orangene Strich-Linie mit der Beschriftung R33. Dieser Dieselmotorkraftstoff ist innerhalb der Norm DIN EN 590 [47] definiert und bereits an einigen Tankstellen in Deutschland öffentlich erhältlich [41; 42]. Die Produktion des regenerativen Kraftstoffs muss natürlich analog dem Stromnetz ausgebaut werden.

Neben den Entwicklungsaufgaben auf der Energieversorgungsseite gibt es ingenieurtechnische Lösungen und Ansätze auf der Komponentenseite. Die Zellchemie wird hinsichtlich der Energiedichte und der verwendeten Materialien optimiert. Bei den meistverwendeten NMC-Zellen (aktive Materialien Nickel, Mangan und Cobalt) werden NMC111-Zellen z. B. durch NMC622-Zellen ersetzt [43]. Die für deren Einführung notwendigen Randbedingungen sind nicht in der Berechnung berücksichtigt, aber es zeigt die realistischen Möglichkeiten auf, zumal unter Berücksichtigung des von „Agora Energiewende“ für 2030 prognostizierten Strommixes. Die Produktion der Zelle schlägt dann mit 77 kg CO<sub>2äq</sub>/kWh zu Buche, bei Verwendung des Strommixes gemäß der Zielvorgabe der EU für 2050 wären es nur noch 66 kg CO<sub>2äq</sub>/kWh.

Der Verbrauch in der Nutzungsphase würde bei diesem Strommix von gegenwärtig 93 g CO<sub>2äq</sub>/km auf dann 45 g CO<sub>2äq</sub>/km sinken.

Ferner wird in verschiedenen bundesweiten Projekten („reFuels“ und „C3-Mobility“) die Synthese und der Import von regenerativ hergestelltem Dieselmotorkraftstoff bearbeitet. Das Ziel ist hier z. B. paraffinischer Diesel aus Fischer-Tropsch-Fertigung mit CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft (DAC) und energetischer Versorgung mit Windenergie (z. B. als Import aus Windenergie- und Solarenergie-reichen Gebieten). Bei Nutzung derartiger Kraftstoffe in dem betrachteten dieselmotorischen Fahrzeug werden die THG-Emissionen in der Nutzungsphase auf 32,5 g CO<sub>2äq</sub>/km sinken. Entsprechende Ottokraftstoffe sind analog Teil der Entwicklung.

Die Betrachtung dieser Ziele für das Jahr 2050 erfordert schon heute intensive Entwicklungen, die wie zuvor dargestellt bereits zu ersten Ergebnissen geführt haben. In der LCA-Betrachtung dieser kommenden Technologien gibt es hohe Unsicherheiten. Die Umsetzungswahrscheinlichkeiten und -aufwendungen sowie die Kohärenz zu den Langfristzielen werden immer entscheidender als detaillierte Werte.

Grundsätzlich betrachtet werden, wenn aber noch nicht berücksichtigt, die Potenziale, die für alle Komponenten gleichermaßen gelten. Die in der Wasserstoffstrategie geplante Direktreduktion des Eisens in den Stahlwerken wird zu einem signifikant niedrigeren CO<sub>2</sub>-Rucksack beim Glider führen. Parallel hierzu hat die Automobilindustrie begonnen, ihre Produktion CO<sub>2</sub>-neutral aufzustellen und das Gleiche von ihren Zulieferern zu fordern. Damit werden alle Fahrzeugtypen bei niedrigeren Produktionswerten starten können. Die weltweite Umstellung auf erneuerbare Energiequellen wird sich neben der Verbrauchsseite auch durch die Versorgung der Produktionsseite in deutlich geringeren Produktionsemissionen zeigen. Die Abbildung dieser Potenziale ist in der aktuellen Studie nicht berücksichtigt, da hierzu alle Verknüpfungen der Datenbank „ecoinvent 3.5“ aktualisiert und mit Zukunftswerten versehen werden müssten.

In der Kombination von niedrigem CO<sub>2</sub>-Rucksack der Produktion und niedrigen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in der Nutzung werden hier mehrere richtige Pfade eingeschlagen, deren Ziel geschlossene Ressourcenkreisläufe sein müssen.



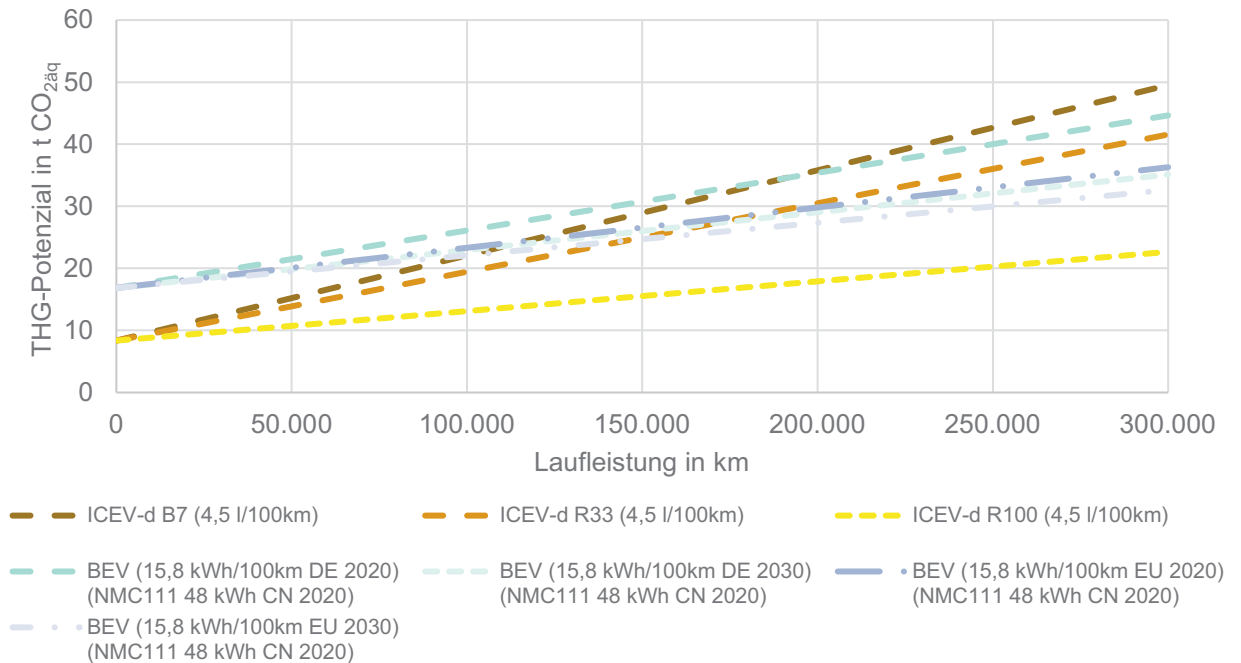


Bild 11. Einfluss der CO<sub>2</sub>-Belastung des Energieträgers im Verbrauch für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Dieselfahrzeuge

Die multikriterielle Betrachtung einer Umweltbilanz versucht eine parallele Darstellung mehrerer Kriterien. Für den Endbenutzer wichtige Kriterien sind natürlich auch die Gesamtkostenbilanz für den jeweiligen Anwendungsfall und die Energie- und Rohstoffbilanz sowie soziale Effekte. Diese Studie fokussiert sich aber auf die in einer Umweltbilanzierung ermittelbaren Größen, die in weiteren Wirkungskategorien berechnet werden. So wie bei der Kernenergie die Endlagerthematik zu spät angegangen wurde, gilt es hier, die Bereiche menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität, Ökosystemeinflüsse und Ressourcenknappheit zu analysieren. Aus der Vielzahl der Wirkungskategorien wurden für diese Studie ausgewählt:

- **Humantoxizität:** Beschreibt die erhöhte Neigung zur Karzinombildung

Die Größe wird mit  $HTP_{inf}$  (Human Toxicity Potential) abgekürzt und in kg 1,4-DCB-Eq (1,4-Dichlorbenzol-Äquivalente) angegeben.

- **fotochemische Ozonbildung (Sommersmog)**

Die Größe wird mit POFP (Photochemical Oxidant Formation Potential) abgekürzt und in kg NMVOC berechnet und beschreibt die Verstärkung der Oxidierung der primären VOC-Schadstoffe (flüchtige, organische Verbindungen) und damit einen Ozonbildner.

- **Naturraumbeanspruchung (Flächennutzung)**

Die Größe wird mit NLTP (Natural Land Transformation Potential) abgekürzt und in m<sup>2</sup> berechnet.

- **Versauerungspotenzial (Schädigung des Ökosystems durch Bildung von Säuren)** wird mit MEP abgekürzt (Marine Eutrophication Potential) und in der Einheit von kg Stickstoffäquivalenten berechnet.

Die Abbildung dieser zusammen mit den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten fünf Wirkungskategorien erfolgt in einem Netzdiagramm (Bild 12), wobei alle Werte auf einen fossilen Diesel (ICEV-d B7) als Basis normiert wurden und deswegen mit relativen Einheiten in einem Diagramm dargestellt werden können.

Während die Lösungen hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Äquivalente recht dicht beieinander sind, bleiben hinsichtlich der weiteren Wirkungskategorien noch Unterschiede, die meist der Energieversorgung bedingen. Die weiten Transportwege (China-EU) als Teil der Batterieherstellung zeigen sich z. B. in der Humantoxizität.

Diese Betrachtung erlaubt auch die Abbildung der Effekte der kommenden Technologien mit Blick auf den heutigen Strommix und einen Einsatz im Jahr 2030 (Bild 13 und Bild 14).

**Nutzung DE 2020, Zellenproduktion (NMC111) CN 2020**

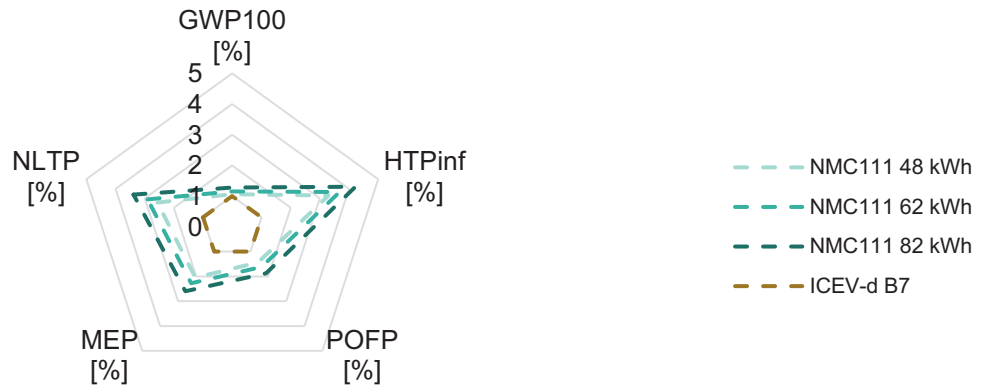


Bild 12. Multikriterielle Betrachtung mehrerer Wirkungskategorien

Basis 2020 mit GWP100 (Treibhausgaseffekt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten)  
 HTPinf - Humantoxizität  
 POFP - Sommersmogpotenzial  
 MEP - Versauerungspotenzial  
 NLTP - Landnutzung  
 Diesel als Referenz

**Nutzung DE 2030, Zellenproduktion (NMC111) CN 2030**

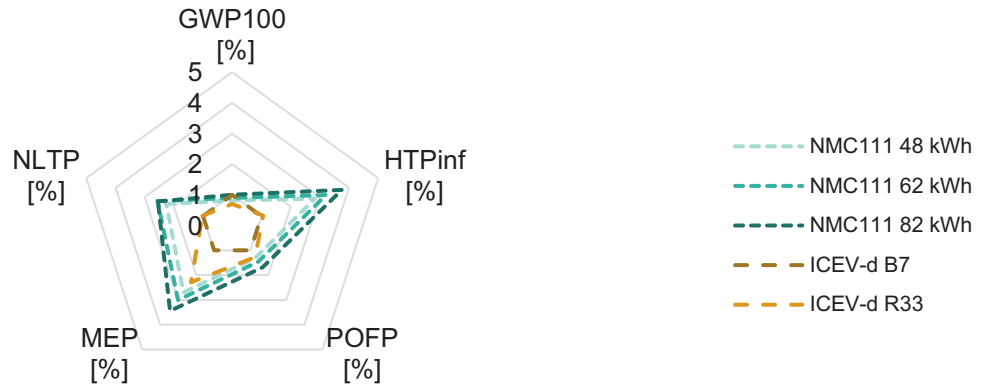


Bild 13. Multikriterielle Darstellung mehrerer Wirkungskategorien mit Blick auf den Einsatz heutiger Technologien im Jahr 2030 bei Produktion in China und dem R33-Blend

**Nutzung DE 2030, Zellenproduktion (NMC111) EU 2030**

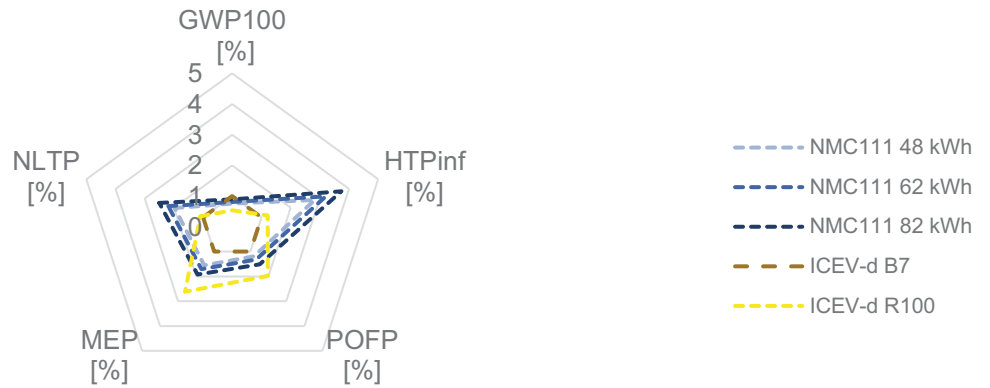


Bild 14. Multikriterielle Darstellung mehrerer Wirkungskategorien mit Blick auf den Einsatz neuerer Technologien (NMC111) im Jahr 2030 bei Verlagerung nach Europa und einem mit regenerativer Energie gewonnenen FT-Diesel

**Nutzung DE 2020, Zellenproduktion (NMC622) CN 2020**

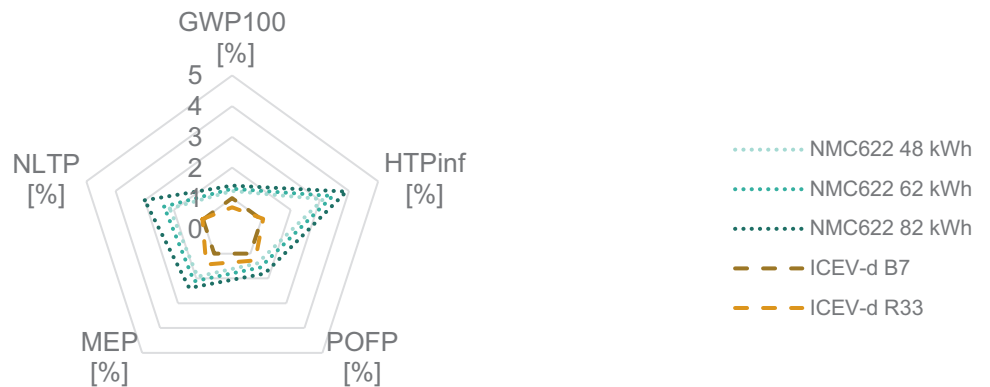


Bild 15. Multikriterielle Darstellung mehrerer Wirkungskategorien mit Blick auf den Einsatz neuerer Technologien (NMC622) im Jahr 2020

In Bild 15 und Bild 16 werden die Potenziale optimierter Zelltechnologien auch bei aktuellem Strommix deutlich, während die Wirkungsfaktoren aufgrund des Transports deutlich sind.

Diese Potenziale können gehoben werden, wenn die Zellenproduktion nach Europa verlagert wird und sich

der Strommix wie von der Europäischen Kommission gefordert entwickelt.

Alle Betrachtungen basieren auf einer Nutzung der WLTC-bezogenen Verbrauchswerte.

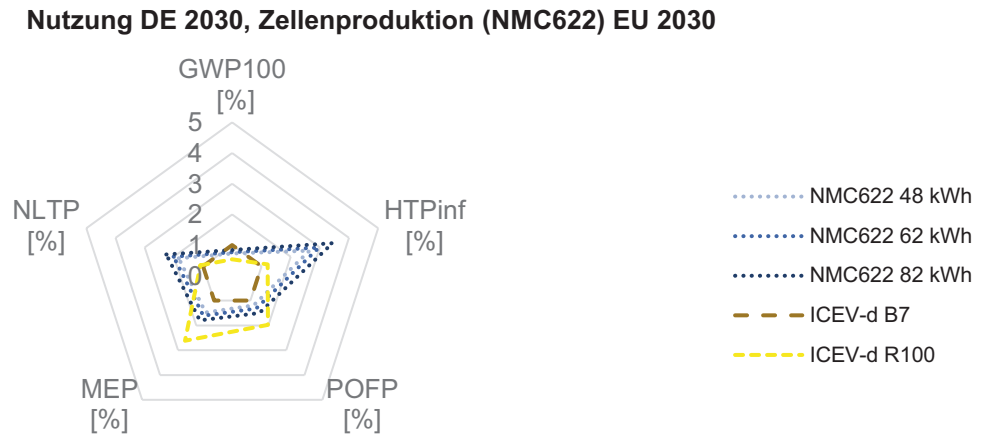


Bild 16. Multikriterielle Darstellung mehrerer Wirkungskategorien mit Blick auf den Einsatz der optimierten Technologien im Jahr 2030

Wenn auch der WLTC das Kundenverhalten im Mittel deutlich besser abbildet, ist das Fahrverhalten doch so individuell wie die Kundinnen und Kunden selbst. Eine Simulation der jeweiligen Kundenstrecken mit dem abgebildeten Fahrzeug würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Um den Gedanken des Themas abzubilden, wurden im VDI-Fachbeirat drei Typen von Fahrenden ausgewählt:

- 1 **Kurzstreckenfahrende:**  
Geschwindigkeitsmittenwert 30 km/h,  
Jahresfahrstrecke 6.000 km  
→ häufiger Kaltstartbetrieb (7 % erhöhter Verbrauch bei Verbrennungsmotoren); kommt in 12 Jahren Fahrzeughaltedauer auf 72.000 km Fahrleistung mit dem Fahrzeug.
- 2 **mittlere FahrerIn/mittlerer Fahrer:**  
Geschwindigkeitsmittenwert 80 km/h,  
Jahresfahrstrecke 12.500 km  
→ durchschnittlicher Mischbetrieb aus Bundesstraßen-, Autobahn- und Stadtverkehr (WLTC-Verbrauch); kommt in 12 Jahren Fahrzeughaltedauer auf 150.000 km Fahrleistung mit dem Fahrzeug.
- 3 **Langstreckenfahrende:**  
Geschwindigkeitsmittenwert 120 km/h,  
Jahresfahrstrecke 60.000 km  
→ häufiger Tempomatbetrieb und hoher Autobahnanteil (20 % reduzierter Verbrauch bei Verbrennungsmotoren); kommt in 12 Jahren Fahrzeughaltedauer auf 300.000 km Fahrleistung mit dem Fahrzeug.

Für jeden Typ FahrerIn bzw. Fahrer wurden die CO<sub>2</sub>-Äquivalente mit Bezug auf die Fahrzeugnutzung berechnet und vergleichend tabelliert: Die Angaben in den Tabellen sind Treibhausgasäquivalente in t CO<sub>2</sub>aq für den jeweiligen Typ FahrerIn bzw. Fahrer und die zugehörigen Laufleistungen. Die Farbgebung der Zellen erfolgt anhand des oberen, mittleren und unteren Drittels der Werte für den jeweiligen Typ FahrerIn bzw. Fahrer (für alle Tabellen konstante Farbgebung).

Tabelle 6 zeigt den schon vorher aufgezeigten Effekt einer Batteriezellenproduktion in China. Eine Verlagerung der Zellenproduktion nach Europa zeigt hier eine deutliche Verbesserung (Tabelle 7), selbst bei heutigem Strommix in der Nutzung.

Tabelle 8 zeigt den Effekt der Verbesserung des Nutzungs-Strommixes auf, sollte die Zellenproduktion auch im Jahr 2030 noch in China durchgeführt werden. Als weitere Maßnahme wird hier beim Diesel der Kraftstoff von B7 zu R33 getauscht.

Wird zusätzlich noch die jetzt schon in vielen Modellen erhältliche Zellentechnologie NMC622 eingesetzt und diese in Europa gefertigt, zeigt sich das Potenzial aller Antriebsarten, in den „grünen Bereich“ zu kommen, siehe Tabelle 9. Brennstoffzelle und Diesel sind in dieser Betrachtung nicht weiter optimiert (Effizienz) oder ihr Kraftstoff vom CO<sub>2</sub>-Rucksack befreit worden.

Tabelle 6. Einsatz der NMC111-Technologie beim Strommix 2020 und Zellenfertigung in China in t CO<sub>2aq</sub>

Nutzstrecke		ICEV-d (B7)	BEV (48 kWh)	BEV (62 kWh)	BEV (82 kWh)	FCEV (2025)
72.000 km	Kurzstreckenfahrende	19,1	23,5	26,1	29,8	19,9
150.000 km	mittlere Fahrerin/ mittlerer Fahrer	28,9	30,7	33,3	37,0	28,0
300.000 km	Langstreckenfahrende	49,5	44,6	47,2	50,9	43,7

Tabelle 7. Einsatz der NMC111-Technologie beim Strommix 2020 und Zellenfertigung in Europa in t CO<sub>2aq</sub>

Nutzstrecke		ICEV-d (B7)	BEV (48 kWh)	BEV (62 kWh)	BEV (82 kWh)	FCEV (2025)
72.000 km	Kurzstreckenfahrende	19,1	20,6	22,0	24,3	19,9
150.000 km	mittlere Fahrerin/ mittlerer Fahrer	28,9	27,8	29,2	31,6	28,0
300.000 km	Langstreckenfahrende	49,5	41,2	43,1	45,5	43,7

Tabelle 8. Einsatz der NMC111-Technologie beim Strommix 2030 und Zellenfertigung in China in t CO<sub>2aq</sub>

Nutzstrecke		ICEV-d (R33)	BEV (48 kWh)	BEV (62 kWh)	BEV (82 kWh)	FCEV (2025)
72.000 km	Kurzstreckenfahrende	16,3	19,7	21,9	25,0	19,9
150.000 km	mittlere Fahrerin/ mittlerer Fahrer	25,0	24,5	26,7	29,8	28,0
300.000 km	Langstreckenfahrende	41,6	33,7	35,9	39,0	43,7

Tabelle 9. Einsatz der NMC622-Technologie beim Strommix 2030 und Zellenfertigung in Europa in t CO<sub>2aq</sub>

Nutzstrecke		ICEV-d (R33)	BEV (48 kWh)	BEV (62 kWh)	BEV (82 kWh)	FCEV (2025)
72.000 km	Kurzstreckenfahrende	16,3	16,9	18,3	20,2	19,9
150.000 km	mittlere Fahrerin/ mittlerer Fahrer	25,0	21,7	23,0	24,9	28,0
300.000 km	Langstreckenfahrende	41,6	30,8	32,1	34,1	43,7

## 5 Zusammenfassung

Diese Studie zeigt den Aufbau einer modularen Umweltbilanz zum Vergleich aktueller Entwicklungstendenzen und verschiedener Antriebskonzepte. Um der bei Ingenieurinnen und Ingenieuren üblichen Vorgehensweise nahe zu kommen, wurde sie an technischen Strukturen orientiert und in einer dem V-Modell ähnlichen Methodik durchgeführt.

Die Datengrundlage der durchgeführten Umweltbilanzen basiert hinsichtlich Materialmix und den grundsätzlichen Wirkungseffekten auf den Inhalten der Datenbank der Firma ecoinvent in der Version 3.5. Zur Erhöhung des Realitätsbezugs wurden wesentliche Teile des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs mithilfe von konkreten Datenangaben von Mitgliedern des VDI-Fachbeirats „Antrieb und Energiemanagement“ ergänzt oder ersetzt. Ferner konnte auf Daten zu Batteriesystemen und deren Produktion zurückgegriffen werden, die am KIT erarbeitet wurden.

Neben der Darstellung der Methodik wurden erste Ergebnisse für einen dieselmotorischen, einen brennstoffzellenelektrischen und einen batterieelektrischen Antriebsstrang abgebildet. Annahmen, Einschränkungen und noch nicht integrierte Daten und Prozesse wurden dezidiert aufgezeigt und Sensitivitäten herausgearbeitet.

Die Analysen zeigen mehrere wesentliche Einflüsse der Randbedingungen einer Umweltbilanz auf die Ergebnisse:

- Einfluss der zugrunde gelegten Laufzeit eines betrachteten Systems (hierbei Ausschluss von Komponentenwechseln)
- Der Einfluss der Effizienz des Antriebs zeigt sich in der Steigung der Geraden bei Betrachtung der Treibhausgasemissionen, besonders bei den Konfigurationen, deren Treibhausgasemissionen wesentlich von der Nutzung bestimmt werden.
- Der Einfluss der verwendeten Batteriekapazität auf die produktionsbedingten Treibhausgasemissionen ist ein Ausgangspunkt für weitergehende Entwicklungen.
- Der Einfluss der CO<sub>2</sub>-Belastung der Produktion und des Betriebs und zugrunde gelegten Strommixes gibt Hinweise, wann und wo welche Technologien mit Blick auf den Klimawandel vorteilhaft einzusetzen sind.
- Effekte auf weitergehende Wirkungskategorien neben den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wurden aufgezeigt. Diesen potenziellen Auswirkungen wird heute

meist eine zu geringe Beachtung geschenkt, weil sie in der Gesetzgebung nicht berücksichtigt werden.

Alle Antriebe werden von einer CO<sub>2</sub>-reduzierten Produktion beim Fahrzeughersteller und bei den Zulieferern profitieren, weil die Produktionsaufwendungen einen wesentlichen Bestandteil der CO<sub>2</sub>-Bilanz ausmachen.

Jeder der betrachteten Antriebe hat das Potenzial, signifikant zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beizutragen. Hierzu brauchen alle Antriebe sowohl eine möglichst CO<sub>2</sub>-arme Produktion als auch einen Betrieb mit einem CO<sub>2</sub>-armen Energieträger. Die Effizienzsteigerung des Antriebs ist ein entscheidender Hebel bei allen Antriebssystemen, um mittelfristig die Mobilität klimaneutral zu realisieren. Dabei hat jeder der betrachteten Antriebe weitere Potenziale und Risiken.

Verbrennungsmotorische Antriebe benötigen zwingend CO<sub>2</sub>-reduzierte Kraftstoffe. Der Vorteil ihres Einsatzes liegt in der Nutzung der bestehenden Infrastruktur (deren Aufbau sonst einen CO<sub>2</sub>-Rucksack bedingt), der Nachteil in der erschwerten Einführung vor dem Hintergrund der regulatorischen Lage. Die aktuelle Gesetzgebung bewertet die CO<sub>2</sub>-Emissionen getrennt nach Sektoren, das heißt, die Treibhausgasemissionen werden produktionsseitig vom Bohrloch zum Fahrzeugtank („well-to-tank“, aber leider in der RED II auch nur begrenzt) und verbrauchsseitig von der Tanksäule/vom Ladepunkt bis zum Rad („tank-to-wheel“) betrachtet. Damit erfolgt keine Cradle-to-Cradle-Betrachtung, wie sie hier dargestellt ist.

Im Rahmen der europäischen und der deutschen Wasserstoffinitiative wird die Aufgabe der hierzu benötigten Infrastruktur angegangen. Je nach THG-Neutralität des verwendeten Wasserstoffs können Brennstoffzellenantriebe mit hohen Wirkungsgraden für viele Anwendungen maßgeschneiderte Lösungen darstellen. Die in der EU geplante Ausrichtung auf Elektrolyse-Wasserstoff wäre hier ein bedeutender Schritt.

Batterieelektrische Antriebe leiden unter dem aktuell hohen Energie- und Materialaufwand in der Produktion. Ein erfolgreiches und energiesparsames Batterierecycling ist hier der Schlüssel zum Erfolg, der das Potenzial hat, die Fahrzeuge deutlich in ihrer CO<sub>2</sub>-Bilanz zu verbessern.

Die Einführung von NMC622-Zellen und die Entwicklung an NMC811-Zellen mit deutlich reduziertem Cobaltbedarf und bis zu 50 % Verbesserungspotenzial hinsichtlich der gravimetrischen Energiedichte

sind Chancen für die batterieelektrischen Antriebe. Die mit dieser Technologie verbundenen Effekte hinsichtlich der Haltbarkeit und der Sauerstoffemission [36 bis 38] und die damit eingeführten technischen Lösungen sind hier noch nicht berücksichtigt.

Für alle Antriebskonzepte gilt gleichermaßen, dass die Effizienz des Antriebs ein wesentliches Element auf dem Weg in eine CO<sub>2</sub>-neutrale Mobilität ist, losgelöst vom Antriebskonzept. Alle Konzepte werden von der Hybridisierung der Antriebe profitieren, wenn es gelingt, die Vorteile zu verbinden. Besonders in derartigen Konfigurationen wird es deutlich, wie eine parallele Analyse der Konfigurationen in einer Umweltbilanz aufzeigen kann, welche Entwicklungsschwerpunkte welche Potenziale in der Treibhausgasbilanz adressieren und welche Risiken gegebenenfalls in weiteren Wirkungskategorien entstehen können.

Damit wird die Umweltbilanzierung zu einem begleitenden Instrument während des Entwicklungsprozesses.

Da sich CO<sub>2</sub> ob seiner durchschnittlichen Verweildauer in der Atmosphäre von 120 bis 1.000 Jahren [44] kumuliert, sollten alle größeren Veränderungen

von umweltbilanziellen Betrachtungen begleitet werden, vor allem mit Blick auf das begrenzte deutsche Restbudget von 6,7 Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bis 2030 [45]. Bis 2030 werden weder batterieelektrische Fahrzeuge noch regenerativ synthetisierte Kraftstoffe in der notwendigen Breite im Feld platziert sein. Damit wird deutlich, dass große Anstrengungen nötig sind, das heißt alle Produktentwicklungen parallel betrieben werden müssen, um in Summe bis 2030 eine ausreichende CO<sub>2</sub>-Reduktion zu erzielen. Dies wird besonders deutlich, wenn die Effekte der Bestandsflotte berücksichtigt werden, bei denen aktuell nur mit regenerativen Kraftstoffen innerhalb der Kraftstoffnormen die Treibhausgasemissionen reduziert werden können.

Mittelfristig haben alle Antriebsformen das Potenzial, dass die Fahrzeuge in üblichen Einsatzszenarien unter 10 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Lebenszyklus liegen können. Durch diese Technologieoffenheit bleibt dem Kunden auch die Wahlmöglichkeit hinsichtlich des Antriebskonzepts, das er mit Blick auf seine persönlichen Anforderungen (Use-Case) optimal auswählen kann.

Nur in einem komplementären Zusammenwirken aller Technologien lässt sich das Optimum erreichen.

## Anhang

Tabelle A1. Energetische Anteile der Kraftwerkstypen am Strommix Deutschlands, der EU und Chinas, prognostiziert für die Jahre 2020 und 2030 [27-29]

	Deutschland		EU		China	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Biomasse	0,0694	0,0614	0,06	0,08	0,015	0,02
Braunkohle	0,1980	0,063	- a)	- a)	- a)	- a)
Erdgas	0,1766	0,2160	0,18	0,19	0,053	0,109
Geothermie	0,0003	0,0005	- b)	- b)	- b)	- b)
Hausmüll	0,0099	0,0097	- b)	- b)	- b)	- b)
Kernenergie	0,0924	0 <sup>c)</sup>	0,23	0,22	0,063	0,054
Mineralöl	0,0069	0,0016	- b)	- b)	- b)	- b)
Fotovoltaik	0,0826	0,1405	0,05	0,07	0,039	0,109
Steinkohle	0,1191	0,0695	0,22	0,15	0,587	0,367
Wasserkraft Laufwasser	0,0332	0,0339	0,06	0,05	0,019	0,014
Wasserkraft Pumpspeicher	- d)	- d)	0,06	0,06	0,15	0,143
Windkraft offshore	0,0479	0,1373	- b)	- b)	0 <sup>b)</sup>	- b)
Windkraft onshore	0,1636	0,2666	0,14	0,18	0,073	0,184

Hinweis: Die zugrunde gelegten Daten der EU aus dem Jahre 2016 haben sich durch reichhaltige Maßnahmen positiver entwickelt, als von der EU prognostiziert. Die Berücksichtigung aktualisierter Daten wird Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein.

- a) Die Literatur, aus der die Strommix-Daten für die EU und China entnommen wurden, schlüsselt Kohlestrom nicht in die Energieträger Braun- und Steinkohle auf. Aus diesem Grund wurde die Annahme getroffen, dass nur Steinkohle verwendet wird.
- b) Die gekennzeichneten Stromerzeugungsarten wurden in der Literatur zu EU und China nicht berücksichtigt.
- c) Dieser Wert ist durch den Ausstieg Deutschlands aus der Kernkraft bedingt.
- d) Bei der angezogenen Quelle wurde nicht zwischen Lauf- und Pumpspeicherkraftwerken unterschieden.



Tabelle A2. Randbedingungen der LCA-Berechnungen und Quellen

Antriebstyp	ICEV-d	BEV	FCEV
Fahrzeugklasse	Mittelklasse		
Antriebsleistung	110 kW	100 kW [46]	100 kW
Kraftstofftank	47 l	-	3,5 kg H <sub>2</sub>
AdBlue-Tank	10,5 l	-	
Batteriekapazität	-	48 kWh 62 kWh 82 kWh	1,4 kWh
Batteriemasse (Batteriepack inklusive Halterung, Kühlung und Batteriemanagementsystem)	-	NMC111 [19, 24], NMC622 [21] 457,1 kg    365,7 kg 590,5 kg    472,7 kg 781,0 kg    624,8 kg	
Verbrauch nach WLTC	4,5 l/100km [38]	15,8 kWh/100km [46]	0,76 kg H <sub>2</sub> /100km
EG-Leergewicht (92/21/EWG)	1.493 kg	1.615 kg	1.411 kg
Glider	Wird identisch angenommen: 1.040 kg.		
Fahrzeugmasse	m <sub>Leer</sub> + m <sub>Fahrer</sub> + m <sub>Tank</sub> + m <sub>Antrieb</sub>	1.720 kg    1.629 kg 1.853 kg    1.735 kg 2.044 kg    1.888 kg	m <sub>Leer</sub> + m <sub>Fahrer</sub> + m <sub>H<sub>2</sub>-Tank</sub> + m <sub>Antrieb</sub>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Abkürzung	Bedeutung
-d	Zusatz für Dieselmotor	LCA	Ökobilanz (engl.: life cycle assessment)
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (engl.: battery electric vehicle)	LCI	Sachbilanz (engl.: life cycle inventory)
BJ	Baujahr	LCIA	Wirkungsabschätzung (engl.: life cycle impact assessment)
B7	Diesekraftstoff nach DIN EN 590 [47] mit 7 % Volumenanteil Bio-kraftstoff (FAME)	MEP	Meeresversauerungspotenzial (engl.: marine eutrophication poten-tial)
CCS	CO <sub>2</sub> -Speichertechnik (engl.: carbon capture and storage)	NLTP	Transformationspotenzial natürli-chen Landes (engl.: natural land transformation potential)
CN	China	NMC	Bestandteile von Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxiden, die in Li-thium-Ionen-Batterien verbaut wer-den
DE	Deutschland	Pkw	Personenkraftwagen
EU	Europäische Union	POFP	Sommersmogpotenzial (engl.: pho-tochemical oxidant formation poten-tial)
DAC	Verfahren zur Gewinnung von Koh-lenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) direkt aus der Umgebungsluft (engl.: direct air capture)	R33®	Markenname für einen Diesel-Blend mit 26 % Volumenanteil re-generativem synthetisiertem paraffi-nischem Diesel, 7 % Volumenanteil FAME und 67 % Volumenanteil fossilem Diesel
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl.: fuel cell electric vehicle)	R100	100 % regenerativ synthetisierter paraffinischer Diesel
GWP100	Klimawandelpotenzial (engl.: global warming potential) über 100 Jahre Verweildauer	THG	Treibhausgas, angegeben in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten
HTPinf	Humantoxizitätspotenzial (engl.: human toxicity potential)	SMR	Dampfgasreformierung (engl.: steam methane reforming)
ICEV	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (engl.: internal combustion engine vehicle)	WLTC/P	Worldwide Harmonized Light Vehi-cles Test Cycle/Procedure
IFKM	Institut für Kolbenmaschinen (Karlsruher Institut für Technologie)		
ITAS	Institut für Technikfolgenabschät-zung und Systemanalyse (Karlsruher Institut für Technologie)		

## Literaturverzeichnis

- [1] ILCD: ILCD Handbook; General guide on LCA; Detailed guidance
- [2] DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement; Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin: Beuth Verlag
- [3] DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement; Ökobilanz- Anforderungen und Anleitungen. Berlin: Beuth Verlag
- [4] WEBER, Philipp; TOEDTER, Olaf; BUCHGEISTER, Jens; KOCH, Thomas: Ökobilanzierung – Kontroversen vorprogrammiert? In: ATZextra 2019
- [5] VDI 2206:2004-06 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag
- [6] WEBER, Philipp; TOEDTER, Olaf; BUCHGEISTER, Jens; KOCH, Thomas: Ökobilanzierung - Kontroversen vorprogrammiert? In: Sonderprojekte ATZ/MTZ 24 (2019), S2, S. 12–15
- [7] WIETSCHHEL, Martin; KÜHNBACH, Matthias; RÜDIGER, David: Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland. [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2019/WP02-2019\\_Treibhausgasemissionsbilanz\\_von\\_Fahrzeugen.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2019/WP02-2019_Treibhausgasemissionsbilanz_von_Fahrzeugen.pdf) (zuletzt abgerufen am 11. September 2020)
- [8] BUCHAL, Christoph; KARL, Hans-Dieter; SINN, Hans-Werner: Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO<sub>2</sub>-Bilanz? <http://www.cesifo-group.de/DocDL/sd-2019-08-sinn-karl-buchal-motoren-2019-04-25.pdf> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [9] HAO, Han; QIAO, Qinyu; LIU, Zongwei; ZHAO, Fuquan: Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. In: Resources, Conservation and Recycling 122 (2017), S. 114–125
- [10] QIAO, Qinyu; ZHAO, Fuquan; LIU, Zongwei; HE, Xin; HAO, Han: Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle. In: Energy 177 (2019), S. 222–233
- [11] BUNDESVERBAND ELEKTROMOBILITÄT BEM: Regulierung öffentlicher Ladeinfrastruktur: BEM schlägt stärkere Verantwortung der Netzbetreiber vor. BEM Pressemitteilung. <https://www.bem-ev.de/bem-pressemitteilung-regulierung-oeffentlicher-ladeinfrastruktur/> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [12] ADAC: Aktuelle Elektroautos im Test: So hoch ist der Stromverbrauch. 2020
- [13] FRISCHKNECHT, Rolf; JUNGBLUTH, Niels: Overview and Methodology: Data v2.0. ecoinvent report No. 1. 2007
- [14] FORD MOTOR COMPANY: Ford Focus Broschüre. Stand: Mai 2019. 2019
- [15] FORD MOTOR COMPANY: Der neue Ford Focus: Lieferprogramm, Ausstattung, Technische Daten. Ford Focus IV. Stand: 01.08.2018.
- [16] SIMON, Kevin: Lebenszyklusanalyse von Personenkraftwagen hinsichtlich des Abgasreinigungssystems. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, IFKM; ITAS. Bachelorarbeit. 2018
- [17] NORDELÖF, Anders; GRUNDITZ, Emma; TILLMAN, Anne-Marie; THIRINGER, Torbjörn; ALATALO, Mikael: A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part I: design and composition. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 23 (2018), Nr. 1, S. 55–69
- [18] NORDELÖF, Anders; TILLMAN, Anne-Marie: A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part II: manufacturing processes. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 23 (2018), Nr. 2, S. 295–313
- [19] PETERS, Jens F.; WEIL, Marcel: Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries. In: Journal of Cleaner Production 171 (2018), S. 704–713
- [20] EMILSSON, Erik; DAHLÖF, Lisbeth: Lithium-Ion Vehicle Battery Production: Status 2019 on Energy Use, CO<sub>2</sub> Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [21] RESEARCHINTERFACES: What do we know about next-generation NMC 811 cathode? <https://researchinterfaces.com/next-generation-nmc-811-cathode/> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [22] HOU, Peiyu; YIN, Jiangmei; DING, Meng; HUANG, Jinzhao; XU, Xijin: Surface/Interfacial Structure and Chemistry of High-Energy Nickel-Rich Layered Oxide Cathodes: Advances and Perspectives (45)
- [23] XU, Jing; LIN, Feng; DOEFF, Marca M.; TONG, Wei: A review of Ni-based layered oxides for rechargeable Li-ion batteries. In: Journal of Materials Chemistry A 5 (2017), Nr. 3, S. 874–901

- [24] NOH, Hyung-Joo; YOUN, Sungjune; YOON, Chong Seung; SUN, Yang-Kook: Comparison of the structural and electrochemical properties of layered Li[NixCoyMnz]O2 (x = 1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.85) cathode material for lithium-ion batteries
- [25] KORTHAUER, Reiner: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [26] M. MÉNARD: Strimmix in Ökobilanzen: Auswirkungen in der Strommodellwahl für Produkt- und Betriebsökobilanzen. 1998
- [27] AGORA ENERGIEWENDE: Energiewende 2030: the big picture: Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende. Berlin: Agora Energiewende, 2017 (Impulse)
- [28] EUROPEAN COMMISSION: EU reference Scenario 2016: Energy transport and GHG emissions Trend to 2050 2016
- [29] WANG ZHONGYING: China Renewable Energy Outlook 2019. Beijing, 2020
- [30] GREENDELTA; CIROTH, A. (Mitarb.); DI NOI, C. (Mitarb.); LOHSE, T. (Mitarb.); SROCKA, M. (Mitarb.): openLCA 1.9: Comprehensive User Manual. Manual Version: June 2019, 2019
- [31] ELLINGSEN, Linda Ager-Wick; MAJEAU-BETTEZ, Guillaume; SINGH, Bhawna; SRIVASTAVA, Akhilesh Kumar; VALØEN, Lars Ole; STRØMMAN, Anders Hammer: Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. In: J. Ind. Ecol. 18 (2014) 1, S. 113ff.
- [32] ELLINGSEN, Linda Ager-Wick; SINGH, Bhawna; STRØMMAN, Anders Hammer: The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. In: Environmental Research Letters 11 (2016), Nr. 5, S. 54010
- [33] NOH, Hyung-Joo; YOUN, Sungjune; YOON, Chong Seung; SUN, Yang-Kook: Comparison of the structural and electrochemical properties of layered Li[NixCoyMnz]O2 (x = 1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.85) cathode material for lithium-ion batteries
- [34] JUNG, Roland: Degradation Mechanisms of Hig-Energy Electrode Materials for Lithium-Ion Battries. München, 2018 (1)
- [35] JUNG, Roland; STROBL, Philipp; MAGLIA, Filippo; STINNER, Christoph; GASTEIGER, Hubert A.: Temperature Dependence of Oxygen Release from LiNi 0.6 Mn 0.2 Co 0.2 O 2 (NMC622) Cathode Materials for Li-Ion Batteries (11)
- [36] JUNG, Roland ; LINSENMANN, Fabian ; THOMAS, Rowena ; WANDT, Johannes ; SOLCHENBACH, Sophie ; MAGLIA, Filippo ; STINNER, Christoph ; TROMP, Moniek ; GASTEIGER, Hubert A.: Nickel, Manganese, and Cobalt Dissolution from Ni-Rich NMC and Their Effects on NMC622-Graphite Cells (2)
- [37] SCHEBEK, Liselotte; CIKOVANI, Yalda; BIEMANN, Kirsten; BULACH, Winfried; POGANIETZ, Witold-Roger; DÜPMEIER, Clemens; KUSCHE, Oliver; SIMON, Sonja; CIROTH, Andreas; SROCKA, Michael; RÖWER, Veit; SALOMO, Bert; ZSCHUNKE, Tobias; LOHMANN, Jessica; ROSNER, Vincent; WAGNER, Hermann-Josef; ELTROP, Ludger; HENßLER, Martin; ARNOLD, Karin; TARGIEL, Thomas: Schlussbericht Vorhaben BioEnergieDat : Bereitstellung einer aktuellen und harmonisierten Datenbasis als Beitrag zur Weiterentwicklung einer nachhaltigen Bioenergiestrategie. (zum Aktenzeichen 0203V0134A, B, C, D, E, F, G des Projektträgers Jülich). Version 1.0. 2013
- [38] MORK, Aiko; HEIMERMANN, Christian; SCHÜTTENHELM, Martin; FRAMBOURG, Michael; HENN, Michael; LÖSCHE-TERHORST, Tobias: CO2-Lighthouse Diesel Engine from Volkswagen Group Research. In: ECKSTEIN, Lutz; PISCHINGER, Stefan; HAMMERMÜLLER, Benedikt; WOLSFELD, Rainer (Hrsg.): 27. Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology: October 8th-10th, 2018, Eurogress Aachen, Germany, 1-2. Aachen: Institute for Automotive Engineering, RWTH Aachen, 2018
- [39] ROYAL DUTCH SHELL P.L.C: Shell's ambition to be a net-zero emissions energy business. <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/shells-ambition-to-be-a-net-zero-emissions-energy-business.html> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [40] BP P.L.C.: BP sets ambition for net zero by 2050, fundamentally changing organisation to deliver. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bernard-looney-announces-new-ambition-for-bp.html> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [41] Synthetische Kraftstoffherstellung von Bosch: Klimaneutral tanken mit eFuels. In: [freenet.de](https://www.freenet.de) (2020-08-13)
- [42] ROYAL DUTCH SHELL P.L.C: Shell und EDi Energie-Direkt präsentieren CO2-armen Diesel für. <https://www.shell.de/medien/shell-presseinformationen/2019/shell-and-edi-energy-direct-present-low-carbon-diesel-for-everyone.html> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [43] PILLOT, Christophe: The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2018-2030 (Battery Experts Forum 2019). Frankfurt, 2019
- [44] UMWELTBUNDESAMT: Die Treibhausgase. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [45] UMWELTRAT: Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO2-Budget. [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2016\\_2020/2020\\_Umweltgutachten\\_Kap\\_02\\_Pariser\\_Klimaziele.pdf?\\_\\_blob=publication-File&v=21](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_02_Pariser_Klimaziele.pdf?__blob=publication-File&v=21) (zuletzt abgerufen 11. September 2020)

- [46] ADAC: VW e-Golf ADAC Info: Autodatenbank Detailseite. <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokatalog/detail.aspx?mid=266575&bezeichnung=vw-e-golf> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)
- [47] DIN EN 590:2017-10 Kraftstoffe; Dieselmotoren; Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [48] <https://www.fch.europa.eu/news/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition> (zuletzt abgerufen 11. September 2020)

## Die VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik

Die VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (FVT) bietet mit ihren acht 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 Studenten und Jungingenieuren sowie den weiteren VDI-Fachgesellschaften ist die VDI-FVT national und international mit weiteren Kooperationspartnern vernetzt. Die VDI-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

### **Sprecher, Gestalter, Netzwerker**

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 145.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Als Sprecher der Ingenieure und der Technik gestalten wir die Zukunft aktiv mit. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft



# Themen, die Sie auch interessieren könnten:

[www.vdi.de/publikationen](http://www.vdi.de/publikationen)

VDI/VDE-Studie „Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge“

VDI-Handlungsempfehlung „Automatisiertes und autonomes Fahren“

VDI-Handlungsfelder „Initiative Stadt:Denken – Erkenntnisse und Anregungen für die Stadt der Zukunft“

VDI-Statusreport „Luftqualität und Fahrzeugantriebe“

VDI-Statusreport „Automatisiertes Fahren“